

Bashir Fakih

Tribologisch und elektrisch Induzierte Effekte im Kommutator-Bürste-Kontakt im permanent erregten Gleichstrommotor

Ilmenauer Beiträge zur elektrischen Energiesystem-, Geräte- und Anlagentechnik (IBEGA)

Herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann
(Fachgebiet Elektrische Energieversorgung) und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger
(Fachgebiet Elektrische Geräte und Anlagen)
an der Technischen Universität Ilmenau.

Band 21

Bashir Fakih

**Tribologisch und elektrisch Induzierte
Effekte im Kommutator-Bürste-Kontakt
im permanent erregten Gleichstrommotor**



Universitätsverlag Ilmenau

2018

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 17. Oktober 2017
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Martin Dienwiebel
(Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mücklich
(Universität des Saarlandes)
Tag der Verteidigung: 14. Mai 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net/>

ISSN 2194-2838 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-181-2 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000117

Titelfotos:

© iStockphoto.com : JLGutierre ; timmy ; 3alexnd ; Elxeneize ; tap10
yuyang/Bigstock.com

M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

*Wer aufhört, besser zu werden, hat
aufgehört gut zu sein!*

Robert Bosch

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (Pfinztal), Mikrotribologie Centrum, im Auftrag der Robert Bosch GmbH angefertigt. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meiner Promotion auf verschiedenste Art und Weise unterstützt haben.

Mein erster Dank gilt meinen Betreuern Prof. Dr. Martin Dienwiebel und Univ.-Prof. Frank Berger für die Ermöglichung dieser Arbeit durch intensive Betreuung, sowie für die Unterstützung und anregende Diskussionen. Mein Dank gilt dem Leiter des Geschäftsfeldes der Tribologie, Herrn Prof. Matthias Scherge für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und Unterstützung.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Firma Robert Bosch GmbH, Herrn Philipp Hugelmann, Herrn Jürgen Halfmann, Herrn Dirk Bühler und Herrn Wolfgang Schrittenlocher für die Zusammenarbeit, sowie für intensive Diskussionen meiner Dissertationsthemen bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Bürokollegen Roman Böttcher, der mit Ratschlägen und Denkanstößen zur Seite stand. Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffmechanik für die freundliche Aufnahme, die wissenschaftliche und technische Betreuung, sowie ihre ständige Diskussionsbereitschaft bedanken. Insbesondere möchte ich Herrn Eberhard Nold für die XPS-Messungen und Dominic Linsler für die Erstellung der FIB-Schnitte danken.

Ein besonderer Dank geht an Linda Rozincsak und Susanne Böttcher für das Korrekturlesen meiner Dissertation. Ein weiterer Dank geht an Phuong Thao Mai und Sebastian Wöhr, die mit ihrer Bachelor- und Diplomarbeit einen Beitrag geleistet haben.

Mein persönlicher herzlicher Dank gilt meiner Ehefrau Fatima, die durch ihre anhaltende moralische Unterstützung diese Arbeit erst ermöglicht hat. Des Weiteren danke ich meinen Eltern, Schwestern und Schwagern, die mir in schwierigen Zeiten Rückhalt gaben.

Kurzfassung

Ausschlaggebend für die Lebensdauer eines Gleichstrommotors ist der Verschleiß des tribologischen Systems Kohlebürste-Kommutator. Für eine längere Lebensdauer sollen in dieser Arbeit gezielte Modifikationen im Tribosystem durchgeführt werden, um dessen Verschleißbeständigkeit zu erhöhen. Ausführliche Literaturrecherchen haben verdeutlicht, dass bisher keine Erkenntnisse über die Wirkung der Materialorientierung, den morphologischen Eigenschaften der Kohlebürsten und einer möglichen Beeinflussung durch einen Schmierfilm vorliegen. Da in diesen Bereichen noch Verbesserungspotential im Tribosystem Kohlebürste-Kommutator vermutet wird, bilden die drei Themen den Inhalt dieser Arbeit.

Im ersten Teil dieser Dissertation wurde der Einfluss der Materialausrichtung der Kohlebürste auf den Kommutator-Bürste-Kontakt untersucht. Dazu wurden Kohlebürsten mit axialer, radialer und tangentialer Pressrichtung in einem Prüfstand untersucht. Reibungs- und Verschleißwerte differierten zwischen den einzelnen Varianten bei stromlosen Versuchen, wobei die axiale und die radiale Varianten niedrige Verschleißwerte zeigten. Durch die Analyse des Systems konnten unterschiedliche Reibmechanismen festgestellt werden. Bei bestromten Versuchen erhöhten sich die Verschleißwerte markant und zeigten keinen deutlichen Unterschied zwischen den Bürsten mit unterschiedlicher Pressrichtung. Andererseits wiesen die Kommutatorlamellen ungleichmäßigen Verschleiß zwischen der auflaufenden und der ablaufenden Lamellenkante auf. Zur Optimierung dieses Effekts wurde ein Verfahren zur Festigkeitssteigerung des Kupfers angewendet, mit dem das Verschleißverhalten abgesenkt und homogenisiert werden konnte.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Einfluss eines Schmierfilms auf den Reibkontakt charakterisiert. Bei bestromten Prüfstandsversuchen kamen schlecht leitende, sowie ein gut leitender Schmierstoff zum Einsatz. Durch die Zugabe einer ionischen Flüssigkeit bei der gut leitenden Variante konnte der hohe Verschleiß von geschmierten Systemen reduziert werden.

Im dritten Teil wurde der Einfluss der Sintertemperatur bei der Bürstenherstellung auf das tribologische Verhalten untersucht. Bei der Analyse der Bürsten konnten hochohmige und niederohmige Varianten detektiert werden. Durch chemische Analysen von Bruchflächen konnte eine Anreicherung von Fremdelementen an den Korngrenzen festgestellt werden. Mithilfe eines Stichversuchs konnte belegt werden, dass die Prozessführung bezüglich der Temperatursteuerung einen übergeordneten Einfluss auf die Entstehung von niederohmigen Bürsten hat, indem sich bei einigen Parametern die Kupferpartikel besser verbinden und somit die Leitfähigkeit gesteigert wird.

Abstract

The wear of the tribologic system carbon brush and commutator of a DC motor is decisive for its lifetime. For a longer lifetime of the device, specific modifications are requested to achieve better wear resistance of the tribosystem. Detailed literature research illustrated the absence of knowledge about the effects of a distinct orientation of brush materials, the morphological characteristics of the brush and the influence of a lubricating film on the tribologic system. Since these subjects are believed to imply a potential for optimization of the motor performance, these three topics present the matter of the presented work.

In the first part the influence of the brush materials direction on the contact behaviour of the DC motor was investigated. For this aim, brushes with axial, radial and tangential material orientation were analyzed on a test rig. In non-conducting mode, friction and wear values differed between the individual variants. The results showed that the lowest brush wear was determined at the axial and radial variant. By analyzing the system, different friction processes were observed during the currentless experiments. With the application of current, the brush wear increased and showed no more obvious differs. At the same time a inhomogeneous wear pattern could be observed on the commutator lamellae. To optimize this effect, a method for increasing the strength of the commutator copper content on the surface has been applied. As a result, the wear of the commutator segments could be lowered and homogenized.

In the second part of the thesis, the influence of a lubricant film on the frictional contact is characterized. The applicability of a conductive as well as a nonconductive oil type was analyzed. By adding an ionic liquid to the lubricant oil the high wear rate of the system could be reduced.

In the third part, the influence of the sintering temperature during the manufacturing process on the tribological behaviour was investigated. Within the analysis, brushes with high and low resistivity were detected. Through chemical analysis of fracture surfaces accumulation of foreign elements at the grain boundaries could be observed. It could be proved by means of a sampling test that the sinter process parameters with respect to the temperature control have a parent influence on the development of low resistive brushes. The finding is based on the better conjunction of copper particles in the brush, resulting in an increase of conductivity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielstellung der Arbeit	1
2	Grundlagen	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise eines permanent erregten Elektromotors	3
2.2	Tribologisches System Kohlebürste-Kommutator	5
2.2.1	Kohlebürste	5
2.2.2	Kommutator und Patina	8
2.2.3	Reibung	10
2.2.4	Verschleiß	12
2.2.5	Lichtbogen	13
2.3	Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems	15
2.3.1	Das Ellipsoidmodell zur Berechnung der Kontakttemperatur zwischen der Bürste und dem Kommutator	15
2.3.2	Die Beziehung zwischen elektrischem Potenzial φ und Temperatur T_θ im unsymmetrischen Kontakt	17
2.3.3	Wärme durch die Reibung	21
2.3.4	Die mechanische Kontaktfläche	23
2.3.5	Temperaturanstieg in Abhängigkeit der Zeit aufgrund der Rotations- bewegung	25
2.4	Messmethoden	28
2.4.1	Aufbau eines Kohlebürstenprüfstands	28
2.4.2	Dauerlauf-Prüfstand	32
2.4.3	Analytik	33
3	Pressrichtung der Bürsten	39
3.1	Stand der Technik	39
3.2	Zielsetzung	40
3.3	Probenkörper und Versuchsparameter	40
3.3.1	Kohlebürste	40
3.3.2	Kommutator	41

3.3.3	Versuchsparameter	42
3.4	Gefügeanalyse der Kohlebürsten mit verschiedenen Pressrichtungen	42
3.4.1	Spezifischer elektrischer Widerstand	45
3.5	Stromlose Versuche ohne Kommutierungsstrom	46
3.5.1	Verschleiß und Reibungswärme	46
3.5.2	Topographie	48
3.6	Versuche mit Strom ohne Kommutierungssystem	48
3.6.1	Verschleiß- und Temperaturmessung	48
3.6.2	Chemische Zusammensetzung der Lamellen	49
3.7	Triboversuche mit Kommutierungssystem am Dauerlaufprüfstand	52
3.7.1	Verschleiß	52
3.7.2	Analyse der Proben aus dem Dauerlaufprüfstand	53
3.8	Festigkeitssteigerung durch Partikelbestrahlung	61
3.8.1	Oberflächenbehandlung des Kommutators durch Partikelbestrahlung	62
3.8.2	Topographische Analyse	62
3.8.3	Gefügeanalyse und chemische Zusammensetzung	63
3.8.4	Dauerlaufversuch	64
3.9	Diskussion	66
3.9.1	Beurteilung der Materialorientierung in der Kohlebürste	66
3.9.2	Einfluss der Pressrichtung auf das Bürstenverhalten bei stromlosen Versuchen	66
3.9.3	Wärmeleitung, abhängig von der Werkstofforientierung und Anzahl der Graphitebenen	69
3.9.4	Einfluss des Stroms auf das Bürstenverhalten mit unterschiedlichen Pressrichtungen	72
3.9.5	Einfluss des Kommutierungsstroms auf das Tribosystem in Abhängigkeit der Materialorientierung	75
3.10	Kurzzusammenfassung	79
4	Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren	81
4.1	Grundlagen für Schmieröle im elektrischen Kontakt	81
4.2	Zielsetzung	83
4.3	Reibungs- und Verschleißmessungen von geschmierten Kontakten	85
4.3.1	Auswahl der Schmieröle	85
4.3.2	Verschleißmessung am KBP ohne Kommutierungsstrom	86
4.3.3	Verschleißmessung mit Kommutierungsstrom	91
4.4	Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte	93
4.4.1	Topographie	93

4.4.2	Mikrostrukturanalyse	96
4.5	Diskussion	106
4.5.1	Einfluss des Schmieröls auf die Reibung und den Verschleiß	106
4.5.2	Modell zum Kommutatorverschleiß	110
5	Einfluss der Sintertemperatur auf das Bürstenverhalten	115
5.1	Zielsetzung	115
5.2	Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten	115
5.2.1	Verhalten der hochohmigen Bürste am Kohlebürsten-Prüfstand	116
5.2.2	Mechanischer Druckversuch	118
5.2.3	Chemische Analyse	119
5.3	Diskussion	125
5.3.1	Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die chemischen Eigenschaften der Bürste	125
5.3.2	Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die mechanischen Eigenschaften der Bürste	126
5.3.3	Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die elektrischen Eigenschaften der Bürste	126
5.3.4	Korrelation zwischen den Einflussgrößen	127
5.4	Kurzzusammenfassung	130
6	Zusammenfassung und Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	135
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	145
	Anhang A	147
	Anhang B	155
	Anhang C	157
	Publikationen	159

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AFM	Atomic Force Mikroscope
Ag	Silber
At.%	Atomprozent
C	Kohlenstoff
Cu	Kupfer
DLP	Dauerlaufprüfstand
EDX	Energy Dispersive X-Ray
FIB	Focused Ion Beam
Gew.%	Gewichtsprozent
KBP	Kohlebürstenprüfstand
MoS ₂	Molybdändisulfid
N	Stickstoff
O	Sauerstoff
REM	Rasterelektronenmikroskop
PAIL	Polyalphaolefine + Ionic Liquid
PSL	Polyolester auf der Basis von synthetischem Öl
S	Schwefel
SE	Sekundärelektronen
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy

Lateinische Formelzeichen

a_{el}	m^2	elektrische Kontaktfläche
a_{mech}	m^2	mechanische Kontaktfläche
a_{real}	m^2	reale Kontaktfläche
b_{B}	m	Bürstenbreite
c	$J/(\text{m}^3 \cdot K)$	Wärmekapazität
d	mm	Durchmesser eines Korns
e	C	elektrische Ladung
h	$J \cdot s$	Plancksche Konstante
k	$\text{N}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$	Hall-Petch-Konstante
l	m	Dicke der Isolationsschicht
m	kg	Gewicht eines Elektrons
n	-	Anzahl der Graphitebenen
\bar{p}	N/m^2	mittlerer Druck
q	W/m^2	Wärmestromdichte
v_{K}	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
\dot{w}	$\mu\text{m}/\text{h}$	Verschleißrate
z	-	dimensionsloser Parameter

A_{real}	m^2	reale Kontaktfläche
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
F_{N}	N	Normalkraft
F_{R}	N	Reibkraft
H	N/mm^2	Materialhärte
I	A	elektrischer Strom
I_{K}	A	elektrischer Kontaktstrom
J	A/m^2	elektrische Stromdichte
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_{E}	Ω	Engewiderstand
R_{K}	Ω	Kontaktwiderstand
R_{th}	K/W	thermischer Widerstand
T_{K}	s	Kommutierungszeit
T_{θ}	$^{\circ}\text{C}$	maximale Temperatur der Bürste
T_{ϑ}	$^{\circ}\text{C}$	maximale Kontakttemperatur
U_{Anode}	V	Anodenspannungsabfall
U_{B}	V	Lichtbogenspannung
U_{bs}	V	Spannung der Bogensäule
U_{F}	V	Fremdschichtspannung
U_{K}	V	Kontaktspannung
U_{Kathode}	V	Kathodenspannungsabfall
U_{MB}	V	Spannungsabfall der Minusbürste
U_{PB}	V	Spannungsabfall der Plusbürste

Griechische Formelzeichen

Φ	W	Wärmestrom
γ	kg/m ³	Materialdichte
λ	W/(m · K)	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	Reibungskoeffizient
ν	-	Querkontraktionszahl
ξ	-	Elastizitätsfaktor
π	-	Kreiszahl
ρ	$\Omega \cdot m$	spezifischer elektrischer Widerstand
σ	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
τ	N/mm ²	Scherfestigkeit
φ_{Aus}	eV	Austrittsarbeit
φ	V	Potenzial
$\Delta\sigma$	N/mm ²	Festigkeitssteigerung
$\nabla\vartheta$	-	Laplace-Operator

1 Einleitung

Die Produktion von elektrischen Antrieben hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Im Jahre 2014 betrug der Umsatz in Deutschland im Bereich der elektrischen Antriebe ca. 9 Milliarden Euro [1]. Elektromotoren, speziell im Automobilbereich, finden in Lüftern, Kompressoren, Servolenkungen, Scheibenwischern, Fensterhebern und vielen weiteren Komponenten Anwendung. Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten beträgt die Anzahl der eingesetzten Elektromotoren in einem Kraftfahrzeug der Mittelklasse ca. 40 Stück. Die Zahl steigt bis auf 100 Elektromotoren bei Kraftfahrzeugen der Oberklasse [2]. Aufgrund der kostengünstigen Herstellung, des hohen Wirkungsgrads und des einfachen Aufbaus werden permanentmagnetenerregte Gleichstrommotoren im Kraftfahrzeug bevorzugt eingesetzt. Ein negativer Einfluss durch die steigende Anzahl der Elektromotoren im Kraftfahrzeug ist durch das einhergehende hohe Gewicht gegeben, welches zu hohem Kraftstoffverbrauch beiträgt. Die Komponentengröße, sowie die Lebensdauer eines Elektromotors sind im Automobilbereich von sehr großer Bedeutung. Ein wichtiger Parameter, der die Lebensdauer eines Elektromotors negativ beeinflusst, ist der Verschleiß der Kohlebürsten. Aus diesem Grund ist die minimale Länge der Kohlebürste limitiert, um die Lebensdauer des Elektromotors möglichst lang zu halten. Mit der Reduzierung des Bürstenverschleißes könnte das Abmaß der Bürste und folglich auch die Baugröße des Elektromotors verringert werden. Durch die hohe Anzahl an Elektromotoren im Fahrzeug wäre dies ein entscheidender Schritt im Zuge der „Downsizing“-Strategie.

1.1 Zielstellung der Arbeit

In Rahmen dieser Dissertation soll besagter Ansatz verfolgt werden und der Verschleiß des Systems möglichst minimiert werden. Dabei sollen die Mechanismen verstanden werden, die in dem tribologischen System Kommutator-Bürste auftreten und welche die tribologischen und elektrischen Eigenschaften des Kontakts stören. Darüber hinaus sollen gezielte Modifikationen im Tribosystem durchgeführt werden, um dessen Verschleißbeständigkeit zu erhöhen. Zum Erreichen der Ziele werden umfassende Prüfstandsversuche durchgeführt, die zur Identifikation von möglichen Einflussgrößen auf das Verhalten von Bürste und Kommutator führen. Die Korrelation zwischen den Prüfstandsversuchen und modernen analytischen Verfahren soll zur Verifikation der Einflussgrößen führen. Durch das Verständnis des vorliegenden Systems werden gezielte Modifikationen der Einzelkomponenten vorgestellt und deren Wirkung geprüft.

Die Arbeit ist in sechs Kapitel aufgeteilt. Zunächst wird in Kapitel 2 das tribologische System Kommutator-Bürste sowie dessen Werkstoffe vorgestellt werden. Des Weiteren werden die dort verwendeten Proben, die Messeinrichtungen, der Ablauf der Experimente und die angewendeten analytischen Methoden erläutert. Anschließend wird in diesem Kapitel ein Verfahren von SHOBERT (angelehnt an KOHLRAUSCH's und HOLM's Theorie) zur Be-

1 Einleitung

rechnung der Kohlebürste-Kommutator-Kontakttemperatur vorgestellt. Das Methode wird erweitert, um die Erwärmungsberechnung des Kontakts in Abhängigkeit der Graphitorientierung der Bürste berechnen zu können.

Im Kapitel 3 wird der Einfluss der Materialorientierung in Kohlebürsten auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Tribosystems Kohlebürste-Kommutator untersucht. Hierbei wird die Pressung der Kohlebürsten in axialer, radialer und tangentialer Richtung variiert. Bei der axialen und tangentialen Pressung orientiert sich das Bürstenmaterial senkrecht zum Kontakt. Die radiale Pressung führt zur parallelen Orientierung der Bürstenmaterialien zur Kontaktfläche. Um die elektrischen und mechanischen Einflüsse zu separieren, werden Reibungsversuche ohne und mit Bestromung durchgeführt. Im Anschluss werden ausgewählte Proben im realen Motor am Dauerlaufprüfstand untersucht. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die Oberflächenbehandlung des Kommutators durch Partikelbestrahlung, ein Mittel zur Festigkeitssteigerung des Kupfers, angewendet und die Wirkung geprüft. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert. Dazu wird in Verbindung mit der berechneten Kontakttemperatur, den Prüfstandergebnisse und der Ergebnisse der analytischen Verfahren eine Hypothese zum Verschleiß des Kohlebürste-Kommutator Systems aufgestellt. Die aufgestellte Hypothese beruht auf dem Einfluss der unterschiedlichen Pressrichtungen.

Im folgenden Kapitel 4 werden die Eigenschaften des Tribosystems im geschmierten Fall untersucht. Hierbei wird leitendes und nicht leitendes Schmiermittel verwendet und dessen Einfluss mit einem ungeschmierten Tribosystem verglichen. Im Anschluss werden die Ergebnisse diskutiert und mit dem aufgestellten Verschleißmodell erläutert.

Kapitel 5 verdeutlicht den Einfluss der Sintertemperatur auf das Verhalten der Kohlebürsten im Tribosystem. Dabei werden fehlerhaft gesinterte Kohlebürsten mit unterschiedlichen analytischen Methoden charakterisiert. Abschließend werden die Ergebnisse im Zusammenhang mit der Sintertemperatur und den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kohlebürsten diskutiert. Im Kapitel 6 erfolgt die Zusammenfassung der Arbeit sowie einen Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau und Funktionsweise eines permanent erregten Elektromotors

Ein Elektromotor wandelt elektrische in mechanische Energie in Form einer Drehbewegung um. Die in dieser Arbeit untersuchten Motoren gehören zur Gruppe der permanent erregten Gleichstrommotoren. Ein Elektromotor besteht aus einem feststehenden Teil (Stator) und einem rotierenden Teil (Anker). Am Stator sind Permanentmagnete befestigt und dienen zum Erzeugen des äußeren statischen Magnetfeldes. Der Rotor (Anker) besteht aus Kupferwicklungen (Ankerwicklungen) und Stromwender bzw. Kommutator [3][S.837]. Der Kommutator setzt sich aus Kupferlamellen, die voneinander durch Luft isoliert sind, zusammen. An den Lamellenenden sind die Ankerwicklungen angeschlossen. Auf der Kommutatoroberfläche schleifen Kohlebürsten, die den Strom vom Netzteil zum Kommutator leiten.

Die Rotation eines Gleichstrommotors beginnt, sobald eine Ankerwicklung mit elektrischem Strom versorgt wird. Die Stromzufuhr erfolgt dabei über Kohlebürsten und den Kommutator. Wird nun eine Ankerspannung U_A angelegt, entsteht dadurch in der Ankerwicklung ein Ankerstrom I_A . Der Ankerstrom erzeugt im Anker ein Magnetfeld, das dem Erregerfeld entgegenwirkt. Durch die Abstoßung bzw. Anziehung der Magnetfelder mit ungleichen Magnetpolen dreht sich die Motorwelle um eine halbe Drehung. Nun muss das Magnetfeld des Ankers umgepolt werden, damit sich die Drehbewegung fortsetzt [4][S.79]. Dies geschieht über den Kommutator, welcher die Aufgabe hat, die Stromrichtung in der betroffenen Ankerspule und somit das Ankerfeld zu ändern. Dieser Vorgang ist im Elektromotor erforderlich, um eine kontinuierliche Drehbewegung des Motors zu ermöglichen. Dieser Prozess wird als Kommutierung bezeichnet und ist in Abb. 2.1 schematisch dargestellt. Kontaktiert die Bürste nur eine Kommutator-Lamelle, teilt sich der Ankerstrom parallel in zwei Ankerzweige auf (Abb. 2.1 a) [5][S.368]. Durch die Drehbewegung des Kommutators kontaktiert die Bürste in einem Zustand gleichzeitig zwei Kommutator-Lamellen. Als Folge entsteht durch die Bürste ein Kurzschlussstromkreis (Abb. 2.1 b). Die Stromkommutierung erfolgt, sobald die Bürste die kontaktierte Lamelle verlässt und der Kontakt mit der folgenden Lamelle zustande kommt (Abb. 2.1 c). Der Strom der betreffenden Ankerspulen fällt zunächst auf null und steigt wieder mit invertiertem Vorzeichen auf den Wert des Ankerzweigstroms an (Abb. 2.2 a). Es entsteht im idealen Fall eine lineare Kommutierung (Abb. 2.2 a). Während der Kommutierungszeit wechselt das magnetische Feld seine Richtung und somit erfolgt eine kontinuierliche Drehung des permanent erregten Gleichstrommotors. Die Kommutierungszeit T_K lässt sich nach der Formel 2.1 durch die Bürstenbreite b_B und die gleichmäßige Umfangsgeschwindigkeit v_K des Kommutators errechnen [6][S.57].

$$T_K = \frac{b_B}{v_K} \quad (2.1)$$

2 Grundlagen

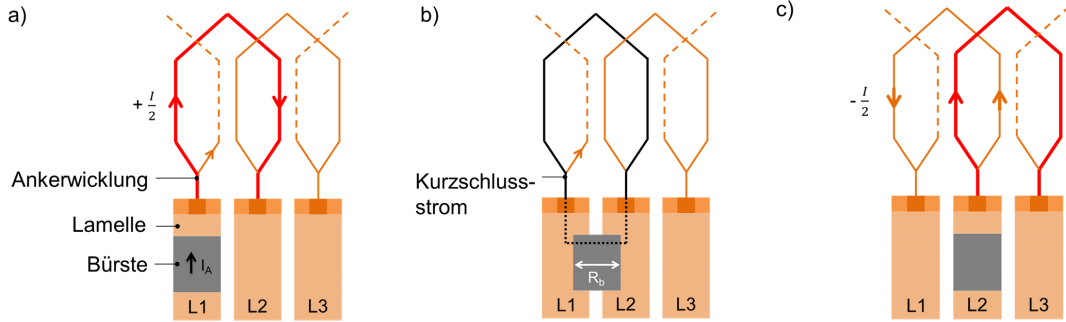


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Kommutierungsvorgangs in einem Gleichstrommotor. a) Kommutierungsanfang $t = 0$, b) Die Bürste befindet sich in der neutralen Zone $t = T_K/2$ und c) Kommutierungsende $t = T_K$.

Die Kommutierung kann vom idealen Fall durch verschiedene Einflüsse verzögert bzw. beschleunigt werden, die zu einem hohen Verschleiß des Tribosystems führen können. Die Einflussgrößen, die die Stromkommutierung beeinflussen, sind wie folgend gegliedert [7]:

- Induzierte Spannung in der kurzgeschlossenen Ankerwicklung
- Bürstenquerwiderstand R_b , der parallel zum Kommutierungsstrom ist
- Übergangswiderstand zwischen Bürste und Kommutator-Lamelle

Während der Kommutierungszeit wird die Stromänderung durch genannte Einflüsse verzögert (Unterkommutierung) oder beschleunigt (Überkommutierung). Bei der Unterkommutierung wird der Verlauf der Stromänderung langsamer erfolgen, sodass der Kommutierungsstrom nach der Kommutierungszeit den Wert des Ankerzweigstroms nicht erreichen kann (Abb. 2.2 b). Dagegen erreicht der Kommutierungsstrom bei der Überkommutierung den Wert des Ankerzweigstroms $-\frac{I}{2}$ vor dem Ende der Kommutierungszeit (Abb. 2.2 c). Als Folge wird die Stromdifferenz nach der Kommutierungszeit in Form von Lichtbögen ausgeglichen. Dadurch werden sowohl die Bürsten als auch die Kommutator-Lamellen stark beansprucht. Für den Fall einer Überkommutierung verschleißt die positive Bürste stärker als die negative Bürste, während im Fall einer Unterkommutierung der umgekehrte Fall zutrifft [8][S. 25].

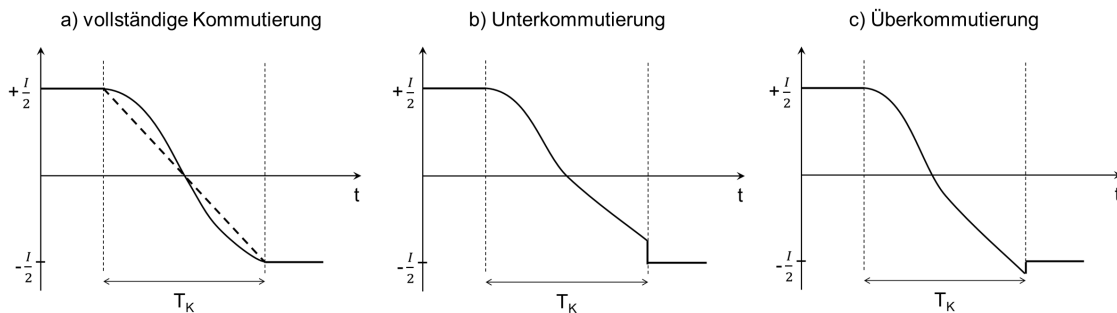


Abbildung 2.2: Stromverläufe während der Kommutierung im a) idealen Fall, b) Fall einer Unterkommutierung und c) Fall einer Überkommutierung [8][S. 25].

2.2 Tribologisches System Kohlebürste-Kommutator

In den bürstenbehafteten Gleichstrommotoren treten die tribologischen Effekte im Kohlebürste Kommutator-Kontakt auf. Während des Betriebs schleift die Kohlebürste auf dem Kommutator und verursacht mithilfe der mechanischen Beanspruchung, sowie der entstandenen Wärme chemische und mechanische Veränderungen im Bereich der Grenzschicht. Dabei entsteht eine Zwischenschicht, welche als sogenannte „Patina“ bezeichnet wird. Die Kohlebürste, der Kommutator, die Patina und das Umgebungsmedium werden im Folgenden als Tribosystem bezeichnet. In Abb. 2.3 ist ein Tribosystem eines bürstenbehafteten Gleichstrommotors dargestellt.

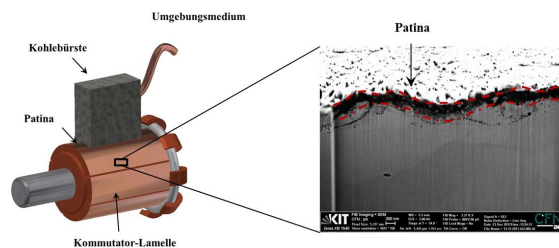


Abbildung 2.3: Das tribologische System Kommutator-Bürste sowie ein FIB-Schnitt einer Patina (rot gekennzeichnet).

2.2.1 Kohlebürste

Die Kohlebürste ist aufgrund ihrer Funktion, den Strom vom Netzteil in den Kommutator über die Gleitbewegung zu übertragen, ein entscheidendes Element im Elektromotor. Für ein gutes Laufverhalten müssen die Kohlebürsten gute tribologische und elektrische Eigenschaften gewährleisten. Dabei sollen die Kohlebürsten besonders gute Gleiteigenschaften, sowie eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Diese Parameter werden durch den ausgewählten Werkstoff der Kohlebürste und dessen Modifikation bestimmt.

Für eine ungeschmierte Gleitbewegung ist klassischerweise die Auswahl von Graphit als Bürstenwerkstoff aufgrund seiner guten Gleiteigenschaft und Leitfähigkeit bevorzugt. Graphit besteht aus dem Element Kohlenstoff (engl. Carbon). Kohlenstoff ist nicht metallisch und kommt in mehreren Modifikationen: Diamant, Graphit und Fullerenen vor. Das Kohlenstoffatom besitzt eine Elektronenkonfiguration von $1s^2, 2s^2, 2p^2$. Das Orbital der Valenzelektronen vom Kohlenstoffatom bildet in Graphit eine sp^2 -Hybridisierung und ein p_z -Orbital. An dieser Hybridisierung sind $2s$, p_x und p_y beteiligt [9][S. 6]. Diese Hybrid-Orbitale überlappen sich mit den Nachbaratomen und bilden auf den Verbindungsachsen zwischen den C-Atomen sogenannte σ -Bindungen (kovalente Bindungen).

Der Aufbau der Graphitstruktur wird in Abb. 2.4 gezeigt. Die Kohlenstoffatome einer Graphitschicht sind hexagonal angeordnet und kovalent gebunden. Diese Anordnungen bilden zusammen eine Graphitebene. Zwischen den einzelnen Ebenen treten schwache Van-der-Waals-Bindungen auf. Der Abstand zwischen den C-Atomen beträgt 142 pm innerhalb einer Ebene und 335 pm zwischen den Ebenen. Folglich sind die Anziehungskräfte zwischen den Ebenen relativ schwach [9][S. 8]. Die Ebenen lassen sich aufgrund dessen leicht gegeneinander verschieben, was für die guten Gleiteigenschaften des Graphits verantwortlich ist.

2 Grundlagen

Graphit hat anisotrope Eigenschaften und weist entlang seiner Basalebene eine gute Leitfähigkeit auf. Jedoch zeigt Graphit im Vergleich dazu senkrecht zur Ebene eine schlechtere Leitfähigkeit. Die physikalischen Eigenschaften von Graphit sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

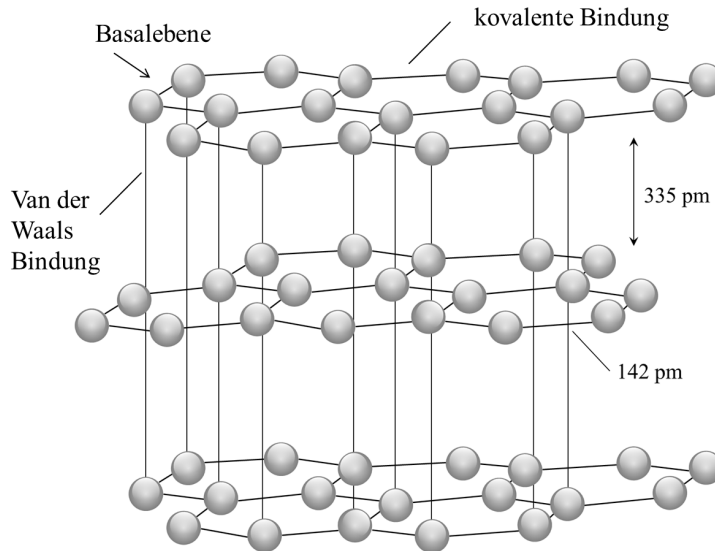


Abbildung 2.4: Struktur eines Graphitgitters.

Physikalische Eigenschaften	senkrecht zur Ebene	entlang der Ebene
Thermische Leitfähigkeit	$4 - 6 \frac{W}{m \cdot K}$	$1000 - 1500 \frac{W}{m \cdot K}$
spez. elektrischer Widerstand	$10^{-2} \Omega \cdot m$	$5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
Elastizitätsmodul	$36 GPa$	$1000 GPa$

Tabelle 2.1: Physikalische Eigenschaften von Graphit entlang und senkrecht zu den Basalebene [10].

Herstellung der Kohlebürste

In diesem Abschnitt wird auf den Herstellungsprozess der Kohlebürste eingegangen. Zur Fertigung der Kohlebürste werden, wie in Abb. 2.5 dargestellt ist, die Rohstoffe der Kohlebürste zerkleinert, gesiebt, gemischt, gepresst, gesintert, graphitisiert und letztendlich geprüft. Die für diese Arbeit relevanten Schritte sind dabei das Pressen und Sintern der Kohlebürste. Die durch diese Prozessschritte resultierenden tribologischen und elektrischen Effekte werden in Kapitel 3 und Kapitel 5 ausführlich diskutiert.

Graphitwerkstoffe für technische Anwendungen werden aus Kohlenstoffwerkstoffen hergestellt. Zur Herstellung werden verschiedene Rohstoffe wie Petrolkokse, Rußkokse, Teeröle und Pechkokse verwendet [11][S.274]. Zu den Graphitwerkstoffen gehören die Werkstoffgruppen Hartkohle, Naturgraphit, Kohlegraphit, Elektrographit, Spezialgraphit und Metallgraphit.

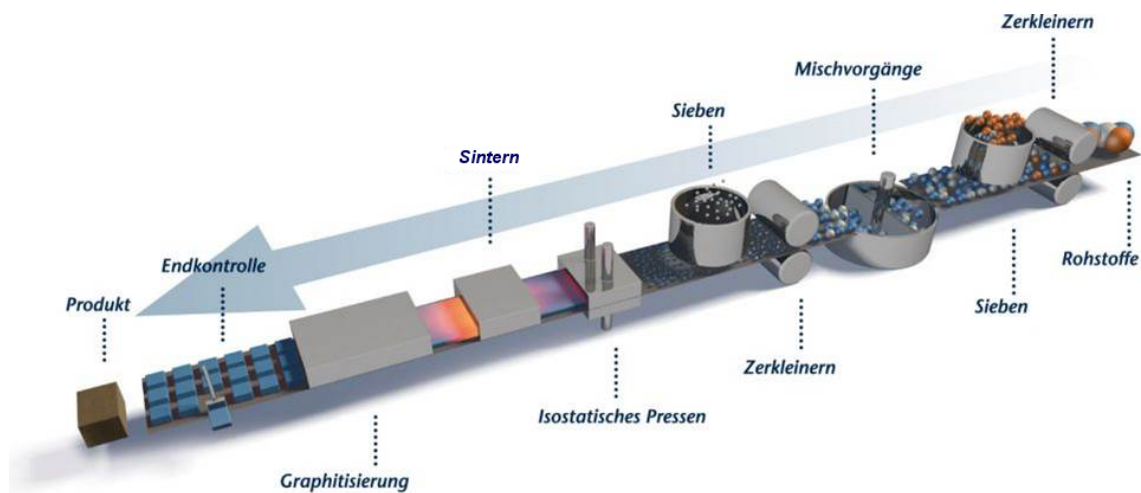


Abbildung 2.5: Herstellungsschritte der Kohlebürsten. Nachdruck aus [12] mit freundlicher Genehmigung der MERSEN GmbH.

Für die Herstellung von Kohlebürsten für Elektromotoren wird Elektrographit bevorzugt, da dieser eine hohe Reinheit, eine gute elektrische Leitfähigkeit, gute mechanische Gleiteigenschaften, einen minimalen Verschleiß, sowie eine hohe Oxidationstemperatur aufweist [13][S. 10]. Der Herstellungsprozess erfolgt in verschiedenen Schritten, die in Abb. 2.5 dargestellt sind. Zunächst werden feste Rohstoffe, wie beispielsweise Graphit, Kokse und Ruß gemischt. Im zweiten Schritt werden diese Rohstoffe zunächst auf definierte Korngrößen (kleiner 0.05 mm) zermahlen und anschließend mit Bindemitteln, wie Pech oder Polymere mit hohem Kohlenstoffgehalt gemischt. Das Mischen geschieht in der Regel bei einer Temperatur zwischen 160 und 170 °C. Bevor das Mischmaterial gepresst wird, kann es wieder zerkleinert und gesiebt werden. Im weiteren Schritt wird das Gemisch zur Formgebung gepresst. Somit orientiert sich das Bürstenmaterial entsprechend zur Pressrichtung. Durch den Pressprozess der Kohlebürsten berühren sich die einzelnen Körner an einigen Punkten. Um die Kontaktfläche zwischen den Körnern zu steigern, werden die Kohlebürsten in einem Ofen bei einer Temperatur von 1200 °C thermisch behandelt. Dieser Prozess wird als Sintern bezeichnet. Die Kontaktfläche zwischen den Körnern nimmt dabei zu und es bilden sich Korngrenzen aus. Während des Sinterns verformen sich die Körner durch Diffusion der Atome von einem Korn zum anderen. Des Weiteren bewegen sich Atome innerhalb eines Kornes. Das ermöglicht ihre Formänderung [14][S. 410]. Dadurch vermindert sich die Porosität im Bürstengefüge und die Härte steigt an.

Anschließend wird der gesinterte Körper durch eine zweite Temperaturbehandlung auf bis zu 3000 °C erhitzt. Dieser Prozess wird als Graphitisierung bezeichnet. Die ungeordneten Kristallite der Rohstoffe (amorpher Kohlenstoff) werden durch Verbindung von weiteren Kohlenstoffatomen erweitert und zu größeren hexagonalen Ringebenen umgeordnet. Der elektrische Widerstand des Graphits nimmt bei diesem Prozess mit steigender Temperatur ab. Es wurde nachgewiesen, dass bei einer Erhitzung des Graphits von 2500 °C bis 3000 °C aufgrund des Kornwachstums die Leitfähigkeit des Graphits markant verbessert wurde [15]. Des Weiteren wird durch Graphitisierung die Verunreinigung im Werkstoff reduziert [11][S. 275]. Eine schematische Darstellung der Graphitisierung des Kohlenstoffs in Abhängigkeit der Temperatur ist in Abb. 2.6 dargestellt.

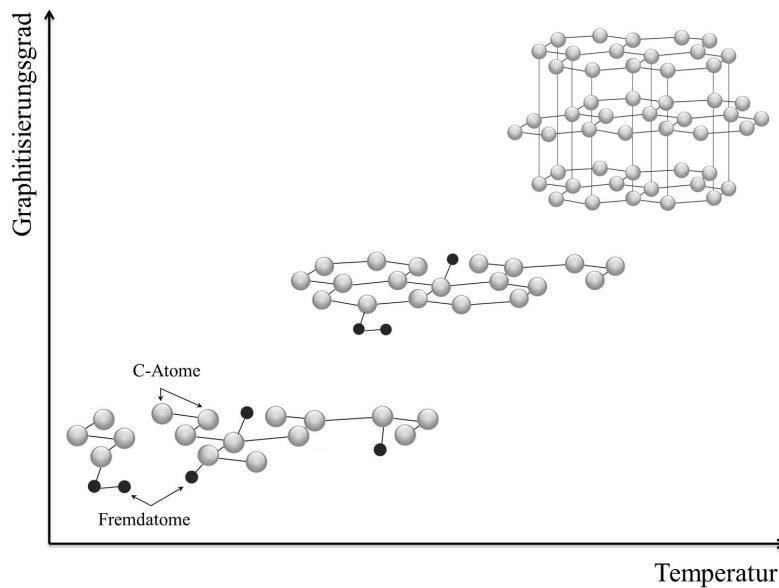


Abbildung 2.6: Graphitisierungsgrad des Kohlenstoffs in Abhängigkeit der Temperatur.

Durch das Sintern wird Bindemittel aus dem Gefüge gelöst und es bilden sich an diesen Stellen Poren. Diese sind in der Kohlebürste unerwünscht, da sie die elektrischen, sowie die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. Des Weiteren lagern sich Wassermoleküle aus der Luftfeuchtigkeit an diesen Stellen ab, welche genannte Eigenschaften weiter verschlechtern würden. Um dem Vorgang entgegenzuwirken, wird die Bürste mit schmelz- und löslichen Stoffen imprägniert, um so die Poren auszufüllen. Als Imprägniermittel wird entsprechend den Betriebsbedingungen ausgewählt [16]:

- Öle und Fette zur Verbesserung der mechanischen Gleiteigenschaften der Bürste,
- Kunststoffe zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit der Bürste,
- Metalle (Cu, Ag, ...) zur Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit der Bürste.

Das Imprägnieren von porösen Bürsten erfolgt durch das Eintauchen in flüssiges Imprägniermittel [16]. Durch die Imprägnierung können die elektrischen und die mechanischen Eigenschaften der Bürste wesentlich verbessert werden, sodass ihre Verschleißfestigkeit und ihre Lebensdauer erhöht werden. Nach der Herstellerangaben werden die Bürste im letzten Arbeitsschritt mit der Kupferlitze zur Stromzufuhr versehen. Abschließend werden die Parameter des elektrischen Widerstandes, der Biegefestigkeit, der Rohdichte und der Härte geprüft.

2.2.2 Kommutator und Patina

Der Kommutator ist der rotierende Teil im Elektromotor und wird zum Zweck der Stromführung aus reinem Kupfer hergestellt. Er besteht aus einzelnen, voneinander isolierten Kupfersegmenten (als Kupferlamellen bezeichnet), deren Enden mit den Ankerwicklungen verbunden sind. Das Modell eines Kommutators mit entfernten Ankerwicklungen ist in Abb. 2.3 dargestellt. Kupfer gilt als edles Metall und weist eine hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit auf. Daher wird das Kupfer für die Anwendungen im Wärmetauscher und als

Leitermaterial eingesetzt. Die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers ist temperaturabhängig. Sie nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Aufgrund der zunehmenden Temperatur kommt es zur stärkeren Schwingung der Atome. Dadurch wird die Bewegung der freien Elektronen behindert und folglich nimmt die Leitfähigkeit des Kupfers ab. Durch die hohe Dichte des Kupfers ($8,9 \text{ g/cm}^3$) zählt es zu den Schwermetallen. Seine Schmelztemperatur liegt bei 1083°C . Allerdings weist das Kupfer eine niedrige Festigkeit, gleichzeitig jedoch eine hohe Zähigkeit auf. Zur Steigerung seiner Festigkeit und Leitfähigkeit werden zusätzliche Metalle wie Silber, Eisen und Magnesium zulegiert [17][S. E55]. Die physikalischen Eigenschaften des Kupfers sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Für gute tribologische Eigenschaften des Kommutators sollte die Oberfläche eine Rauheit aufweisen. Diese trägt zum guten Einlauf des Bürste-Kommutator-Systems bei. BRYANT [18] hat nachgewiesen, dass Oberflächen mit niedrigen Rauheiten zu hohem Bürstenverschleiß führen und zusätzlich Bürstenvibrationen verursachen. Der Verschleiß des Kommutators wurde von LANCASTER [19] untersucht. Er fand heraus, dass der Verschleiß des Kommutators von den Mengen der Bürstenverunreinigungen (harte Verschleißpartikel) abhängig ist. Die auftretenden Lichtbögen zwischen der Bürste und dem Kommutator führen zur elektrischen Erosion der Kommutatoroberfläche. Aufgrund der im Kontakt eingebrachten Energie kann es dabei sogar zum Aufschmelzen des Kupfers kommen [20].

Dichte	$8,93 \text{ g/cm}^3$
Schmelzpunkt	1083°C
Siedepunkt	2595°C
elektrischer Widerstand	$1,7 \times 10^{-8} (\Omega \cdot \text{m})$
elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	$57 \times 10^6 \text{ 1}/(\Omega \cdot \text{m})$
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	$394 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Wärmeausdehnung (von 25 bis 300°C)	$17 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Zugfestigkeit	200 MPa

Tabelle 2.2: Physikalische Eigenschaften von Kupfer [21].

Patina

Auf der Kommutatoroberfläche bildet sich eine dünne Schicht aus Kupferoxiden. Diese Schicht wird als Patina bezeichnet. Sie weist die Eigenschaften eines Festkörpers auf. Ihre Bestandteile setzen sich aus Kupfer(I)-Oxid Cu_2O , Kupfer(II)-Oxid CuO sowie Kohlenstoffablagerungen aus der Bürste zusammen [22]. In Abb. 2.7 ist die Ausbildung einer dunklen Patina auf der Kommutatoroberfläche dargestellt [23][S. 42]. Das nebenstehende Bild zeigt ihre Gefügestruktur mittels eines FIB-Schnitts. Bei der Untersuchung des tribologischen Kontakts konnte gezeigt werden, dass sich nach 1500 Stunden Dauerlauf eine Patina mit einer Dicke von $1,5 \mu\text{m}$ gebildet hat (siehe Abb. 2.7)[24].

Diese Schicht hat sowohl positive, als auch negative Einflüsse auf das Verhalten des Tribosystems. Durch ihre Existenz verbessern sich die Gleiteigenschaften des Systems, da die Patina Kohlestoffreste enthält. Bei trockener Reibung übernimmt die Patina die Aufgabe des Schmierfilms [25][S. 371]. Die Bildung der Patina hat negative Einflüsse auf die Stromübertragung von der Bürste zum Kommutator, da sie halbleitende Eigenschaften aufweist [26]. Somit erhöht sich der Kontaktwiderstand. Die Stromübertragung erfolgt durch „Fritten“ der

2 Grundlagen

Fremdschicht [27]. Während des Frittvorganges entstehen in der Fremdschicht (durch mechanische oder elektrische Zerstörung dieser Schicht), metallische Kanäle, sog. Frittstellen, die von Elektronen durchtunnelt werden [11][S.38]. Dieser Vorgang wird als Frittung bezeichnet. SCHRÖTER [28] nimmt an, dass die halbleitende Oxidschicht den Strom aufgrund ihrer starken Widerstandsabnahme bei höheren Temperaturen ohne Frittung durchlässt. Die Bildung der Patina ist von der Kontakttemperatur, sowie von der Luftfeuchtigkeit abhängig [29]. Es wurde gezeigt, dass sich bei einer Luftfeuchtigkeit von 50% eine dünnere Patina auf dem Kommutator bildet und einhergehend die Gleiteigenschaften, sowie die Verschleißfestigkeit der Bürste verbessert werden. Im Gegensatz dazu konnte bei 10% Luftfeuchte keine Patinabildung beobachtet werden [30]. Des Weiteren hat die Rauheit der Patina einen Einfluss auf den Bürstenverschleiß. Es wurde gezeigt, dass der Bürstenverschleiß mit steigender Patinarauhigkeit zugenommen hat [31].

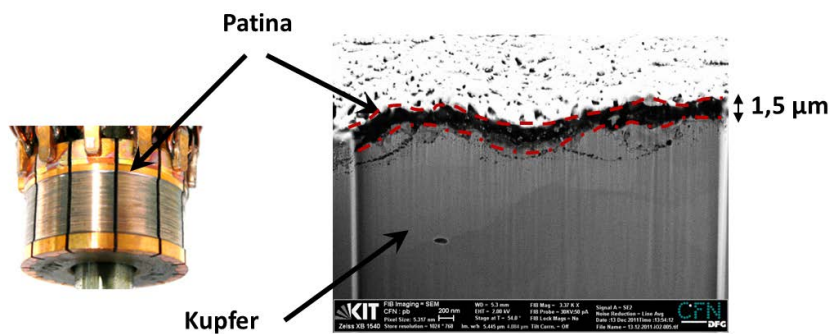


Abbildung 2.7: Dunkle Patina auf dem Kupfer-Kommutator (links), Gefügestruktur der Patina (rechts) [23].

2.2.3 Reibung

Reibung tritt zwischen zwei sich berührenden Körpern auf und beschreibt nach FLEISCHER den Verlust mechanischer Energie bei einer Relativbewegung dieser Körper. Das Reibungsgesetz wurde von AMONTON und COULOMB im ungeschmierten Fall nach Formel 2.2 definiert. Die Reibkraft F_R , die einer Bewegung entgegenwirkt, ist proportional zur auf die Fläche wirkenden Normalkraft und abhängig von der Werkstoffpaarung. Der Reibungskoeffizient μ ist das Verhältnis der Reibkraft zur Normalkraft und kann beim Gleitkontakt von Kohlebürsten und Kommutator unter Umgebungsbedingungen den Wert zwischen 0,05 und 0,3 erreichen [11][S.158]. Im Anfangszustand des tribologischen Prozesses befindet sich das System in der Einlaufphase, in der sich eine vollständige Kontaktfläche zwischen beiden Reibpartnern ausbilden kann [32][S.17]. Nach der Einlaufzeit erreicht der Reibwert ein konstantes Niveau. Durch Schmierung sinkt der Wert des Reibungskoeffizienten und gleichzeitig verringert sich der mechanische Verschleiß. Die Stribeck-Kurve zeigt den Verlauf des Reibungskoeffizienten in geschmierten Reibkontakten μ (Abb. 2.8) in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit v des Kontaktkörpers, der Viskosität η des Schmiermittels und der Pressung p [33]. Mit der Variation der Größen v , η und p treten verschiedene Reibzustände in der Kontaktzone auf. Hohe Reibwerte treten im Bereich der Grenzflächenschmierung auf. In diesem Bereich sind die Grenzflächen mit einer Adsorptionsschicht aus Schmierstoffmolekülen bedeckt. Im Bereich der elasto-hydrodynamischen Schmierung nimmt der Reibwert ab. Der Schmierfilm ist dünn und die beteiligten Körper sind in diesem Bereich metallisch und hydrodynamisch

im Kontakt. Der niedrigste Reibwert wird im Bereich hydrodynamischer Schmierung bei ausreichender Schmierfilmdicke, mittleren und höheren Geschwindigkeiten und kleiner Kontaktfläche erreicht. Die hydrodynamische Schmierung hat einen negativen Einfluss auf den elektrischen Kontakt, da der Stromfluss durch die dicke Schmierschicht gestört wird [33].

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (2.2)$$

Die Reibungskraft ist nach BOWDEN und TABOR [34] von der Schubspannung τ des weichen Materials und den realen Kontaktflächen A_r des Systems abhängig (Formel 2.3). Das Reibungsmodell beruht auf der Annahme, dass plastisches Fließen in der realen Kontaktfläche auftritt.

$$F_R = \tau \cdot A_r \quad (2.3)$$

Tritt ein Schmiermittel zwischen die kontaktierten Körper, so wirkt sich dieses auf die Schubspannung aus. Unter der Annahme, dass das Fluid den Scherwiderstand dominiert, kann die Definition der Viskosität eines Fluids angewendet werden. Die Schubspannung τ wird dann durch das Produkt aus Viskosität η und Schergeschwindigkeit ν in Gl. 2.3 [35][S. 469] ersetzt und es ergibt sich:

$$F_R = \tau \cdot A_r = \eta \cdot \nu \cdot A_r \quad (2.4)$$

Der Reibungskoeffizient lässt sich durch

$$\mu = \frac{\eta \cdot \nu \cdot A_r}{F_N} \quad (2.5)$$

berechnen.

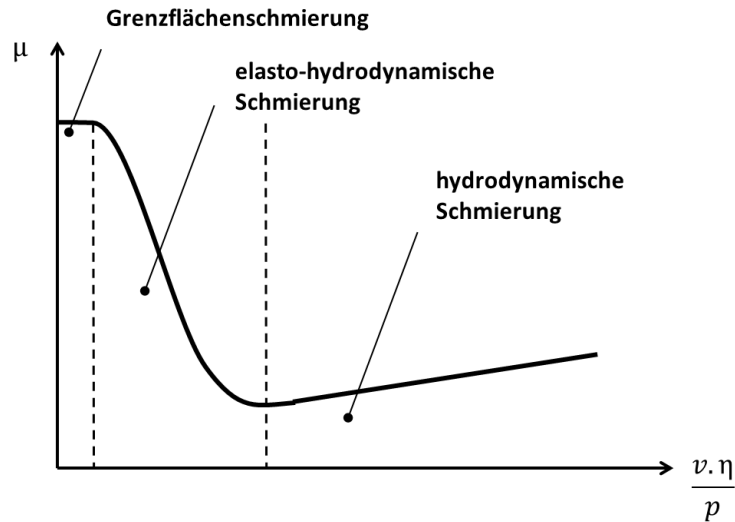


Abbildung 2.8: Darstellung der verschiedenen Reibungszustände in Abhängigkeit der Schmierung.

Die Kontakttemperatur beeinflusst den Reibungsverlauf des Kontaktsystems Kohlebürste-

2 Grundlagen

Kommutator, dessen Verlauf schematisch in Abb. 2.9 dargestellt ist. Steigt die Kontakttemperatur bis zu einem gewissen Wert aufgrund der induzierten Reibungswärme und der elektrischen Verluste an, nimmt zunächst der Reibwert ab. Bei einem Temperaturwert oberhalb der Siedetemperatur des Wassers kommt es zum Verdampfen der Wasserhaut auf der Kommutatoroberfläche und infolge steigt der Reibwert an [36].

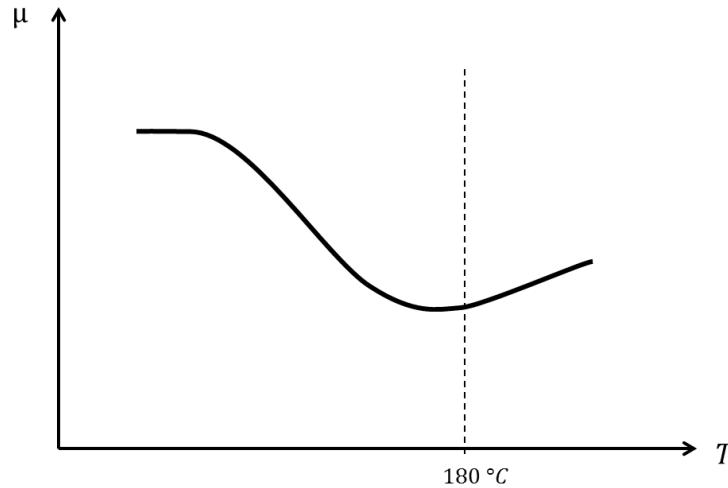


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Reibungskoeffizienten als Funktion der Temperatur [11][S. 159].

2.2.4 Verschleiß

Der Gesamtverschleiß des Tribosystems Bürste-Kommutator setzt sich aus dem elektrischen, sowie aus dem mechanischen Verschleiß zusammen [25][S. 369]. Abb. 2.10 zeigt die elektrischen und die mechanischen Einflussfaktoren, die auf das System Kohlebürste-Kommutator wirken. Der elektrische Verschleiß wird durch den Bürstenstrom, die Kontaktspannung, die Kommutierung und die Polarität beeinflusst [22]. Die Einflussfaktoren des mechanischen Bürstenverschleißes unterteilen sich in Anpresskraft, Rotationsgeschwindigkeit und Reibung. Des Weiteren sind die Umwelteinflussgrößen wie die Luftfeuchtigkeit, Verunreinigungen (z.B. Staub) und aggressive chemische Dämpfe entscheidende Faktoren für den elektrischen und mechanischen Bürstenverschleiß [37].

Die Unter- bzw. die Überschreitung der vorgegebenen Anpresskraft der Bürste trägt auch zum hohen Verschleiß bei. Im Falle des zu niedrigen Bürstendrucks kommt es zu einem hohen Kontaktwiderstand bzw. zum Auftreten von Lichtbögen. Überschreitet die Anpresskraft der Kohlebürste den normalen Wert, erhöht sich der mechanische Verschleiß der Bürste [38][39].

Bei ungünstigen Umgebungsbedingungen, z.B. aufgrund der Kontamination durch Verunreinigungen (Staub), erhöht sich der Bürstenverschleiß [40][41]. Des Weiteren bildet sich in schwefelhaltiger Atmosphäre eine schlecht leitende sulfidische Patina, die zum Auftreten von Lichtbögen führen kann [37]. Bei niedriger Luftfeuchtigkeit kann keine Patina, die für gute Gleiteigenschaften der Bürste verantwortlich ist, auf der Kommutatoroberfläche gebildet werden. Als Folge erhöht sich der Bürstenverschleiß [30][31].

Bei hoher Kontakttemperatur über $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ entsteht abermals ein hoher Bürstenverschleiß. Über der Siedetemperatur von Wasser verdampft die auf der Patina immer vorhandene

Wasserhaut, die auch zu den guten Gleiteigenschaften der Kohlebürste beiträgt [11][S. 159]. Die Oberflächenrauheit und die Rundheit des Kommutators können den Bürstenverschleiß negativ beeinflussen. Dabei kommt es zum Bürstensprung und somit zur Kontakttrennung zwischen den Bürsten und dem Kommutator. Als Folge können Lichtbögen im Kontakt auftreten und die Oberflächen elektrisch erodieren [42].

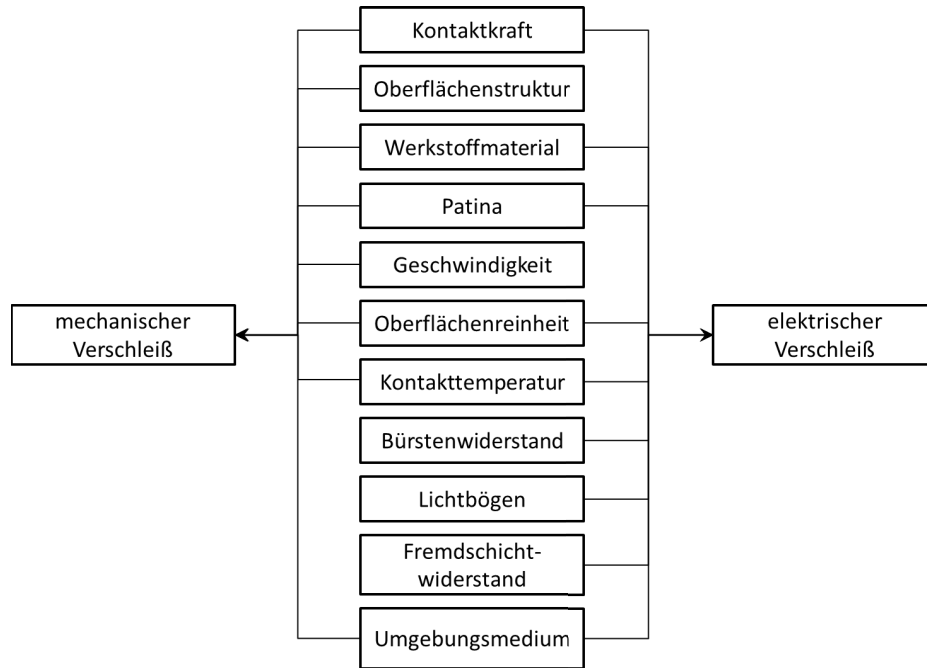


Abbildung 2.10: Einflussfaktoren auf den Verschleiß des Tribosystems Kommutator-Bürste [25].

2.2.5 Lichtbogen

Lichtbögen sind unerwünschte Erscheinungen in Gleichstrommotoren. Sie treten zwischen den Kontakten auf. Ursachen für den Effekt können beispielsweise in Kontakttrennungen, Verunreinigungen bzw. Isolationsmaterial und unvollständigem Kommutierungsstrom gefunden werden. Lichtbögen haben durch eine hohe Temperatur, Materialdampf und Materialtransport eine negative Wirkung auf die beteiligten Bauteile [43]. Eine Voraussetzung zur Lichtbogenentstehung ist ein ionisiertes Medium zwischen den Kontakten. Verliert ein Atom ein oder mehrere Elektronen aus seiner Orbitalschale wird es als ionisiertes Element oder positiv geladenes Ion bezeichnet. Die Ionisation der neutralen Atome im Gasraum führt zur Bildung von freien Ladungsträgern, die zum Transport des Stroms in Form von Lichtbögen zuständig sind. Der Lichtbogen besteht aus der Plasmasäule, sowie dem Kathoden- und Anodenfallgebiet [44]. In Abb. 2.11 ist der Spannungsverlauf in einem Lichtbogen dargestellt [45]. Die Spannung über dem Lichtbogen U_B lässt sich durch

$$U_B = U_{\text{Kathode}} + U_{\text{Anode}} + U_{\text{bs}} \quad (2.6)$$

mit

$$U_{\text{bs}} = l_{\text{bs}} \cdot E_{\text{bs}} \quad (2.7)$$

2 Grundlagen

definieren. Wobei U_{Kathode} der Kathodenspannungsabfall, U_{Anode} der Anodenspannungsabfall, l_{bs} die Lichtbogenlänge und E_{bs} die Säulenfeldstärke ist.

Im Bereich der Bogensäule ist die Feldstärke gering und steigt im Bereich des Kathoden- und Anodenfalls. Die Spannung im Kathodenfall weist einen Wert zwischen 10 und 20 V auf [44]. Gleichzeitig liegt die Stromdichte im Kathodengebiet in einem Bereich zwischen 10^6 bis 10^8 A/cm^2 [46]. Die Kathode ist hauptsächlich für die Erzeugung der Elektronen durch die Thermo-Feld-Emission verantwortlich. Aus diesem Grund sollte ein Kathodenmaterial aus einem temperaturbeständigen Werkstoff gefertigt sein. Die Ansammlung von positiven Ionen vor der Kathode bildet eine positive Raumladungszone und führt zum Spannungsabfall des Bogens, dessen Ausdehnung in der Größenordnung von $10 \mu\text{m}$ liegt [47]. Vor der Anode bildet sich durch Elektronenansammlung eine negative Raumladungszone, die einen kleineren Spannungsabfall des Bogens verursacht. Diese hat gegenüber der Kathode eine größere Ausdehnung, deren Länge im Millimeterbereich liegt [47].

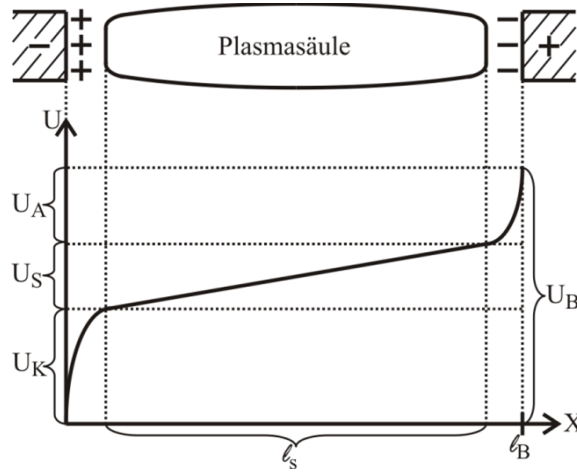


Abbildung 2.11: Spannungsverlauf im Lichtbogengebiet [45].

2.3 Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems

Die Erwärmung des Kohlebürste-Kommutator-Kontakts trägt zum Verschleiß des Tribosystems bei. Eine hohe Kontakttemperatur kann zur Oxidation des Graphits, zum Verdampfen des Kohlenstoffs [48][49][S. 1071], zur zügigen Entwicklung der Patina, zum Schmelzen der realen Kontaktstellen und zum Verdampfen der auf dem Kommutator gebildeten Wasserschicht führen. Die genannten Effekte tragen zum hohen Verschleiß der Kohlebürste bei. Um die Verschleißmechanismen der Bürste zu verstehen, ist die Berechnung der maximalen Temperatur im Kontakt erforderlich.

Das Grundprinzip der Verteilung von Strom und Spannung in kontinuierlichen isotropen Materialien wurde von KOHLRAUSCH [50] im Jahr 1900 betrachtet. Die Anwendung auf die Kontakttheorie wurde von R. HOLM [51] in den Sechzigerjahren erarbeitet. Im gleichen Jahrzehnt entwickelte SHOBERT [52] in Anlehnung an die Arbeiten von KOHLRAUSCH und HOLM ein Modell zur Berechnung der maximalen Kontakttemperatur. PINTSCHER [53] verwendete das mathematische Modell zur Berechnung der Erwärmung des Kontakts Fahrdrachtschleifleiste. In dieser Arbeit wird das Modell von SHOBERT erweitert, um die Erwärmung des Kontakts in Abhängigkeit der Materialorientierung der Kohlebürste zu berechnen. Die in diesem Abschnitt erläuterten Formeln beruhen auf den Veröffentlichungen von HOLM [51][S. 64], SHOBERT [52][S. 138] und PINTSCHER [53][S. 96].

Für die Erstellung des Modells wird zunächst die Wärmeleitung nach einem Ellipsoidmodell eines unsymmetrischen Kontakts (Kohlenstoff und Kupfer) vorgestellt. Weiterhin wird die maximale Temperatur im Kontakt für ein ruhendes System berechnet. Dabei werden die Reibungswärme und die Wärme durch die Stromverluste separat betrachtet. Die Reibungswärme wird in der mechanischen Kontaktfläche der Bürste produziert, während die Wärme durch den elektrischen Strom innerhalb der Bürste, des Kommutators, sowie in der Fremdschicht entsteht. Die für den stationären Fall berechnete Temperatur wird unter der Verwendung des zeitabhängigen Faktors für die Rotationsbewegung abgeschätzt, indem nur ein Teil der Temperatur aufgrund der begrenzten Kontaktzeit erreicht werden kann. Des Weiteren wird die Wärmeleitung in Abhängigkeit der Materialorientierung der Kohlebürsten betrachtet. Die Materialorientierung der Kohlebürste wird für die Berechnung der Kontakttemperatur als orthogonal und parallel zur Kontaktfläche angenommen. Schließlich werden die zeitabhängige Reibungstemperatur und die Temperatur durch die elektrischen Verluste addiert. Mit diesem Modell kann die Temperatur im Kontakt durch Einsetzen von Kontaktspannung, Strom, Drehzahl und Reibungskoeffizient, als Ergebnisse der Prüfstandversuche, berechnet werden. Die Resultate werden anschließend mit den, am Prüfstand gemessenen, Bürstentemperaturen bei verschiedener Materialorientierung der Kohlebürsten verglichen.

2.3.1 Das Ellipsoidmodell zur Berechnung der Kontakttemperatur zwischen der Bürste und dem Kommutator

Für die Berechnung der Kontakttemperatur ist ein physikalisches Modell erforderlich. Dieses Modell stellt im Fall der Stromleitung die Verbindung der Stromlinien in einer realen Kontaktfläche, welche auch a-spot genannt wird, dar. Dabei entsteht in dieser Kontaktfläche ein sogenannter Engwiderstand R_E . In Abb. 2.12 ist ein Kontaktsystem nach einem Ellipsoidmodell zur Herleitung der Formeln für die Berechnung der Kontakttemperatur dargestellt.

2 Grundlagen

Dieses System repräsentiert einen Kontakt zwischen Kohlenstoff und Kupfer. Es handelt sich hierbei um einen unsymmetrischen Kontakt, da es sich um ein System mit Werkstoffen verschiedener Wärmeleitfähigkeiten handelt. Zur Vereinfachung soll nur eine Kontaktfläche mit dem Radius a betrachtet werden. Wenn der Strom durch diese Kontaktfläche fließt, bildet sich in diesem Kontakt ein elektrisches, sowie ein thermisches Feld heraus, dessen Verlauf durch Äquipotenzialflächen dargestellt ist. Die dazu orthogonal stehenden Stromlinien stellen die Einschnürung der Stromlinien in diesem Kontakt dar. Es wird angenommen, dass die Kontaktfläche keine Fremdschicht besitzt und die Mikrorauigkeit nicht berücksichtigt wird. Da es sich um einen unsymmetrischen Kontakt handelt, befindet sich die höchste Temperatur T_{Θ} aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit, sowie des hohen spezifischen elektrischen Widerstands des Graphits in der Bürste. Die Temperatur T_{Θ} wird dem Potenzial φ_1 zugewiesen, wie in Abb. 2.12 gezeigt ist. Die Temperatur im Kontakt ist T_{ϑ} und hat das Potenzial φ_2 . Es werden zwei Bezugspunkte (C und K) betrachtet. Der Bezugspunkt C befindet sich in der Bürste und der Bezugspunkt K liegt im Kommutator (siehe Abb. 2.12). Beide Bezugspunkte weisen eine unendliche Entfernung von der Kontaktfläche auf, sodass diese Stellen nicht von den elektrischen und thermischen Feldern, sowie den Stromlinien beeinflusst werden. Der Bezugspunkt C hat eine Temperatur T_C und das Potenzial φ_0 . Auf der anderen Seite weist der Bezugspunkt K eine Temperatur T_{Cu} und das Potenzial φ_3 auf. Die in Abb. 2.12 gezeigten Teilspannungen (U_1 , U_2 und U_3) stellen die Spannungsabfälle in den gekennzeichneten Bereichen dar. Es wird ein adiabatisches System an der Kontaktfläche angenommen.

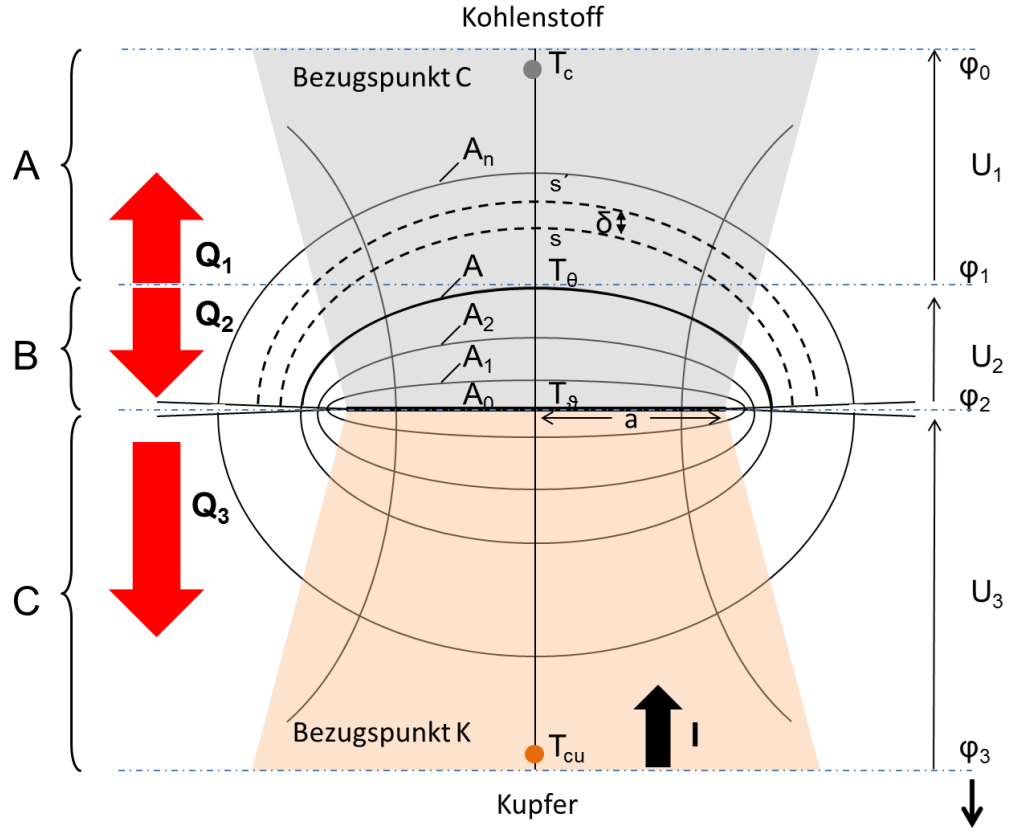


Abbildung 2.12: Ellipsoidmodell nach SHOBERT [52]. Verlauf der Stromlinien und Äquipotentialflächen im ellipsoidförmigen a-spot. Temperaturen und Potentiale eines unsymmetrischen Kontakts [53].

2.3.2 Die Beziehung zwischen elektrischem Potenzial φ und Temperatur T_θ im unsymmetrischen Kontakt

KOHLRAUSCH [50] entdeckte die Beziehung zwischen der elektrischen Spannung und der Temperatur in einem elektrischen Leiter. Diese Beziehung wurde von HOLM [51][S. 64] und SHOBERT [52][S. 142] für die Berechnung der Kontakttemperatur in elektrischen Kontakten verwendet.

Es handelt sich hier um ein unsymmetrisches Kontaktsystem, dessen Werkstoffe (Kupfer und Kohlenstoff) unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit haben. In einem solchen Kontaktsystem fließt die Wärme von einem Bereich mit der höchsten Temperatur zu dem Bereich mit niedrigerer Temperatur ab. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Kohlenstoffs im Vergleich zum Kupfer, weist die Bürste die maximale Temperatur auf. Aus diesem Grund wird das Ellipsoidmodell in drei Teile geteilt A, B und C, in denen der Verlauf des elektrischen Stroms und der Wärme abweichend sind (siehe Abb. 2.12).

Teil A befindet sich im Kohlenstoff. Es wird eine Schale ss' der Dicke δ , die zwischen der Isothermen A mit der Temperatur T_θ und dem Bezugspunkt C mit einer Temperatur T_C liegt, betrachtet (siehe Abb. 2.12). Das Potenzial der Schale ss' ist $\varphi + d\varphi$ sowie die

2 Grundlagen

Temperatur $T + dT$. Es wird darauf hingewiesen, dass die Schale ss' in jedem Teil des Systems betrachtet wird.

Im Teil A des Systems zeigen der elektrische Strom und der Wärmestrom die gleiche Richtung (siehe Abb. 2.12). Aus diesem Grund fließt die Wärme von der Schale mit einer Temperaturdifferenz dT in Richtung des Kohlenstoffs ab. dR_{th} sowie dR sind der thermische und der elektrische Widerstand gegen der Richtung des elektrischen Stroms und des Wärmestroms der Schale ss' . Eine Beziehung zwischen dem thermischen Widerstand dR_{th} und dem elektrischen Widerstand dR ergibt sich aus [52][S. 139]

$$dR_{\text{th}} = \frac{dR}{\rho_C \cdot \lambda_C} \quad (2.8)$$

mit der Annahme, dass der spezifische elektrische Widerstand ρ_C und die Wärmeleitfähigkeit des Kohlenstoffs λ_C temperaturunabhängig sind. Der thermische Widerstand dR_{th} wird durch das Verhältnis der Temperaturdifferenz dT zu der abgeführten Wärmeleistung $\varphi \cdot I$ ermittelt:

$$dR_{\text{th}} = \frac{-dT}{\varphi \cdot I} \quad (2.9)$$

Durch gleichsetzen der Formel 2.9 und Formel 2.8 folgt:

$$\frac{-dT}{\varphi \cdot I} = \frac{dR}{\rho_C \cdot \lambda_C} \quad (2.10)$$

$$\frac{-dT}{\varphi \cdot I} = \frac{d\varphi}{I \cdot \rho_C \cdot \lambda_C} \quad (2.11)$$

$$\frac{-dT}{\varphi} = \frac{d\varphi}{\rho_C \cdot \lambda_C} \quad (2.12)$$

$$-\rho_C \cdot \lambda_C \cdot dT = \varphi \cdot d\varphi \quad (2.13)$$

Durch das Integral der Potenzialdifferenz in Richtung des Spannungsabfalls ergibt sich die Spannung U_1 :

$$\rho_C \cdot \lambda_C \cdot \int_{T_\theta}^{T_C} dT = \int_{\varphi_1}^{\varphi_0} \varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2} \cdot \varphi^2 \quad (2.14)$$

$$\rho_C \cdot \lambda_C \cdot (T_\theta - T_C) = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_0)^2 \quad (2.15)$$

Der Spannungsabfall U_1 im Teil A ergibt sich aus der Differenz der Potenziale:

$$U_1 = \varphi_1 - \varphi_0 \quad (2.16)$$

Wird Gleichungen 2.16 in 2.15 eingesetzt, ergibt sich U_1 aus:

2.3 Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems

$$U_1^2 = 2 \cdot \rho_C \cdot \lambda_C \cdot (T_\theta - T_C) \quad (2.17)$$

Im Teil B befindet sich die Schale ss' zwischen der Isotherme T_θ und der Kontaktfläche mit der Temperatur T_ϑ . In diesem Bereich fließt die Wärme zur Kupferseite, da $T_\theta > T_\vartheta$ ist. Dabei zeigt der Wärmestrom die umgekehrte Richtung zum elektrischen Strom. Analog zum Teil A ergibt sich die Spannung U_2 im Teil B durch das Integral der Potenzialdifferenz zwischen der Schale SS' und dem Kontakt.

$$\rho_C \cdot \lambda_C \cdot \int_{T_\theta}^{T_\vartheta} dT = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \varphi \cdot d\varphi \quad (2.18)$$

Der Spannungsabfall U_2 im Teil B ist:

$$U_2 = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.19)$$

$$U_2^2 = 2 \cdot \rho_C \cdot \lambda_C \cdot (T_\theta - T_\vartheta) \quad (2.20)$$

Teil C befindet sich zwischen der Kontaktfläche mit der Temperatur T_ϑ und dem Bezugspunkt K mit der Temperatur T_{Cu} . In diesem Teil fließt die im Kontakt erzeugte Wärme, sowie die Wärme aus dem Teil B zum Kupfer. Hierbei weist der Wärmestrom eine entgegengesetzte Richtung zum elektrischen Strom auf. Analog zum Teil A und Teil B ergibt sich die Spannung U_3 im Teil C durch das Integral der Potenzialdifferenz zwischen dem Kontakt und dem Bezugspunkt K

$$\rho_{Cu} \cdot \lambda_{Cu} \cdot \int_{T_\vartheta}^{T_{Cu}} dT = - \int_{\varphi_2}^{\varphi_3} (\varphi + U_2) \cdot d\varphi \quad (2.21)$$

$$\rho_{Cu} \cdot \lambda_{Cu} \cdot (T_\vartheta - T_{Cu}) = \frac{1}{2} U_3^2 + U_2 \cdot U_3 \quad (2.22)$$

Da der Spannungsabfall im Kupfer um ein 1000-faches kleiner ist, als der Spannungsabfall im Kohlenstoff, kann $U_3^2 \approx 0$ vorausgesetzt werden [52][S. 143]. Daraus lässt sich die Gl. 2.22 zu

$$U_2 \cdot U_3 = \rho_{Cu} \cdot \lambda_{Cu} \cdot (T_\vartheta - T_{Cu}) \quad (2.23)$$

vereinfachen.

In Abb. 2.13 ist eine Temperaturverteilung über einen unsymmetrischen Kontakt als Funktion des Potentials dargestellt. Im Kohlenstoff weist die Temperaturverteilung eine quadratische Funktion auf. Die höchste Temperatur T_θ liegt dabei im Kohlenstoff [51][S. 62], [52][S. 139]. Für den Kontakt ohne Fremdschicht ergibt sich die Kontaktspannung U_K aus der Summe der Teilspannungen.

$$U_K = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2.24)$$

2 Grundlagen

Wird in diesem Modell die Fremdschicht des Kommutators betrachtet, fällt die Spannung aufgrund der Fremdschicht ab. Der Spannungsabfall über der Fremdschicht nimmt aufgrund des Tunnelwiderstands einen Wert von bis zu 0,2 V an. Somit ergibt sich die Gl. 2.24:

$$U_K = U_1 + U_2 + U_3 + U_F \quad (2.25)$$

Das Verhältnis des Spannungsabfalls im Kupfer und die Summe der Spannungsabfälle im Kohlenstoff entspricht dem Verhältnis der jeweiligen spezifischen Widerstände.

$$\frac{U_3}{U_1 + U_2} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_C} \quad (2.26)$$

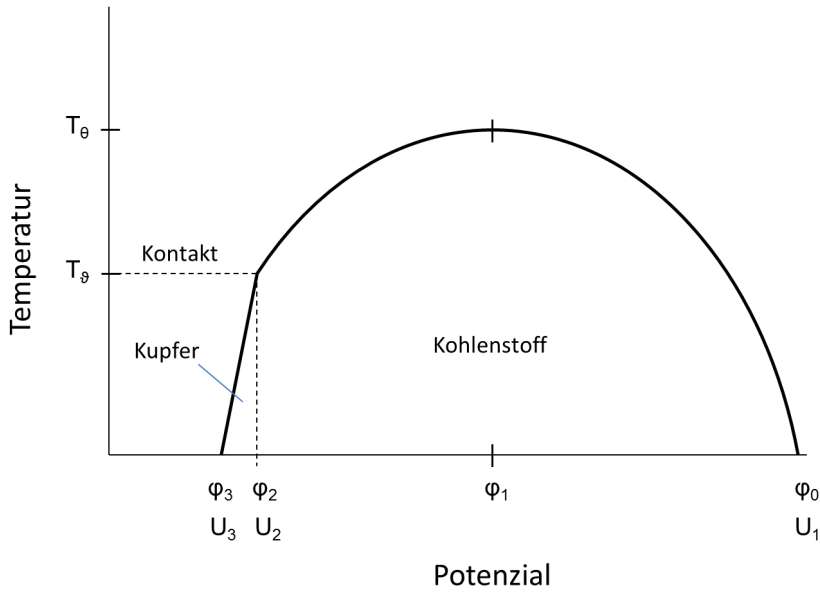


Abbildung 2.13: Temperaturverteilung im Graphit-Kupfer-Kontakt [51][S. 85], [52][S. 143].

Setzt man die Gleichungen 2.17, 2.20 und 2.23 in Gl. 2.26, ergibt sich eine Relation zwischen der höchsten Temperatur T_θ und der Kontakttemperatur T_θ in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Kohlenstoffs und des Kupfers:

$$(T_\theta - T_\theta) + \frac{2\lambda_C \sqrt{T_\theta}}{2\lambda_C + \lambda_{Cu}} \sqrt{T_\theta - T_\theta} - \frac{\lambda_{Cu}}{2\lambda_C + \lambda_{Cu}} \cdot T_\theta = 0 \quad (2.27)$$

Die Lösung dieser quadratischen Gleichung wurde in [52][S. 145] veröffentlicht und ergibt sich durch die Substitution wie folgt:

$$T_\theta = \frac{4\lambda_C(\lambda_{Cu} + \lambda_C)}{(2\lambda_C + \lambda_{Cu})^2} \cdot T_\theta \quad (2.28)$$

2.3 Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems

Die Lösung 2.28 zeigt das Verhältnis der Kontakttemperatur zur Maximaltemperatur im Kohlenstoff in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der beteiligten Materialien für einen ruhenden Kontakt.

Bisher wurden die Gleichungen zur Berechnung der Kontakttemperatur für den ruhenden Kontakt hergeleitet. Allerdings verkürzt sich die Kontaktzeit zwischen den realen Kontaktstellen aufgrund der Rotationsbewegung des Kommutators. Für die Berechnung der Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Zeit bietet HOLM eine graphische Lösung zur Berechnung der zeitabhängigen Maximaltemperatur an. Auf die graphische Lösung wird im Abschnitt 2.3.5 eingegangen. Die folgenden Gleichungen sind von PINTSCHER [53][S. 114] hergeleitet. Allerdings konnte keine rechnerische Lösung für die aufgeführte partielle Differentialgleichung gefunden werden.

Teil 1:

$$\frac{\partial}{\partial r} \cdot (-\lambda_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) = \frac{I^2 \cdot \rho_C}{2 \cdot \pi \cdot r^2} - c_C \cdot \gamma_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.29)$$

Teil 2:

$$\frac{\partial}{\partial r} \cdot (\lambda_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) = \frac{I^2 \cdot \rho_C}{2 \cdot \pi \cdot r^2} - c_C \cdot \gamma_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.30)$$

Teil 3:

$$\frac{\partial}{\partial r} \cdot (-\lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{I^2 \cdot \rho_C}{2 \cdot \pi} \cdot (\frac{1}{b} - \frac{1}{r_\theta})) = \frac{I^2 \cdot \rho_{Cu}}{2 \cdot \pi \cdot r^2} - c_{Cu} \cdot \gamma_{Cu} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.31)$$

2.3.3 Wärme durch die Reibung

Aufgrund der Reibung der Kohlebürsten auf dem Kommutator wird ein Teil der mechanischen Rotationsenergie in thermische Energie umgewandelt. Dadurch wird Reibungswärme im Kontaktbereich erzeugt. Für die Berechnung der Temperatur in der Kommutatoroberfläche wird folgendes angenommen:

- Es handelt sich um eine wahre Kontaktfläche mit der Fläche $A = \pi \cdot a^2$.
- Die wahre Kontaktfläche wird nicht durch Wärmefflüsse der nebenstehenden Kontaktflächen beeinflusst.
- Die im Kontakt entstandene Wärme wird ausschließlich durch Reibung verursacht.
- Die Wärme wird aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Kupfers vollständig in den Kommutator abgeleitet.

Der Wärmestrom, der durch die Reibung entstanden ist, lässt sich durch die Formel 2.32 beschreiben:

$$\Phi_r = \frac{\Delta Q_r}{\Delta t} \quad (2.32)$$

Hierbei ist Φ_r der Wärmestrom, ΔQ_r die Reibungswärmemenge und Δt die Zeiteinheit.

2 Grundlagen

Der Wärmestrom ist als die pro Zeiteinheit ausgetauschte Wärmemenge definiert. Die durch die Reibung entstandene Wärmemenge entspricht der angewandten Reibungsarbeit ΔW_r [53]:

$$\Delta Q_r = \Delta W_r \quad (2.33)$$

Die Reibungsarbeit setzt sich aus dem Produkt der Reibungskraft F_r und des Gleitwegs Δs zusammen:

$$\Delta W_r = F_r \cdot \Delta s \quad (2.34)$$

mit der Reibkraft F_r :

$$F_r = F_N \cdot \mu \quad (2.35)$$

wobei μ der Reibungskoeffizient des Kohlebürste-Kommutator-Systems und F_N die Normalkraft ist.

Wird die Gleichung 2.35 in 2.34 eingesetzt, ergibt sich:

$$\Delta W_r = F_N \cdot \mu \cdot \Delta s \quad (2.36)$$

Der im mechanischen Kontakt entstandene Wärmestrom lässt sich durch

$$\Phi_r = F_N \cdot \mu \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (2.37)$$

mit der Geschwindigkeit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$,

$$\Phi_r = F_N \cdot \mu \cdot v \quad (2.38)$$

berechnen. Da die Wärmeleitfähigkeit in der Bürste niedriger ist, als die im Kommutator, fließt die Wärme von der Bürste in den Kommutator.

Die Reibungstemperatur T_r im Kontakt ist das Produkt aus dem Wärmewiderstand R_{th} des Kommutators und des Wärmestroms Φ_r .

$$T_r = \Phi_r \cdot R_{th} \quad (2.39)$$

Gl. 2.40 beschreibt den Engwiderstand R_E zwischen dem Kontaktpunkt und einer Äquipotenzialfläche. Die Oberfläche des Kontaktpunkts entspricht einem halben Ellipsoid.

$$R_E = \frac{\rho}{4 \cdot \pi} \int_0^\infty \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \kappa) \cdot (\beta^2 + \kappa) \cdot \kappa}} \quad (2.40)$$

wobei ρ der spezifische elektrische Widerstand, α, β die Halbachsen der Kontaktellipse und κ der Parameter ist.

HOLM [51][S. 15] vereinfachte Gl. 2.40, indem die Kontaktfläche als Kreis mit dem Radius a angenommen wurde. Daraus ergibt sich Gl. 2.41. Hierbei gilt $\alpha = \beta = a$.

$$R_E = \frac{\rho}{4 \cdot \pi} \int_0^{\infty} \frac{d\kappa}{(a^2 + \kappa) \cdot \sqrt{\kappa}} \quad (2.41)$$

Für eine lange Verengung bei $\kappa = \infty$ lässt sich der Engewiderstand für einen Kontaktkörper nach Gl. 2.42 vereinfachen.

$$R_E = \frac{\rho}{4 \cdot a} \quad (2.42)$$

Der Engewiderstand eines Kontaktkörpers mit gleichem Material lässt sich durch

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot a} \quad (2.43)$$

berechnen [51][S. 16].

Die im Kontakt entstandene Reibungswärme fließt aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Kupfers zum Kommutator. Der Wärmewiderstand ist analog zum elektrischen Widerstand von dem spezifischen elektrischen Widerstand des Kontaktmaterials abhängig. Die folgende Formel beschreibt den Engewiderstand in einer kreisförmigen Kontaktfläche mit dem Radius a .

$$R_{th} = \frac{1}{4 \cdot \lambda_{Cu} \cdot a} \quad (2.44)$$

wobei λ_{Cu} die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers und a der Radius der mechanischen Kontaktfläche A sind.

Damit lässt sich die allgemeine Reibungstemperatur nach der Gl. 2.45 errechnen:

$$T_r = \frac{F_N \cdot \mu \cdot v}{4 \cdot \lambda_{Cu} \cdot a} \quad (2.45)$$

2.3.4 Die mechanische Kontaktfläche

Für die Berechnung der Kontakttemperatur sind Kenntnisse über die reale Kontaktfläche erforderlich. Zur Abschätzung der Kontaktfläche werden sowohl der elastische, als auch der plastische Fall betrachtet.

Elastischer Kontakt

Zur Berechnung der realen Kontaktfläche im elastischen Fall wird das Modell von HERTZ angewendet. In diesem Modell erfolgt der Kontakt zwischen einer starren Kugel und einem elastischen Halbraum, wie in Abb. 2.14 dargestellt ist. Für die Berechnung der Kontaktfläche sind folgende Annahmen erforderlich:

- ruhende einzelne Kontaktfläche
- keine adhäsive Wirkung zwischen den berührenden Körpern
- Kontakt einer starren Kugel gegen eine ideal glatte Oberfläche
- keine plastische Deformation

2 Grundlagen

- kontinuierliche Verteilung des Normaldruckes innerhalb der Kontaktfläche

Wirkt eine Normalkraft auf die kugelförmige Oberfläche, wird dabei die Kontaktfläche zwischen den Körpern durch die elastische Deformation größer. Die schematische Darstellung des Kontaktfalls zeigt Abb. 2.14. Drückt eine Oberfläche mit dem Radius r bei wirkender Normalkraft F_N in die glatte Oberfläche ein, verformt sich die glatte Oberfläche um die Eindringtiefe d . Dabei lässt sich der Radius a_k der realen Kontaktfläche durch

$$a_k = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_N \cdot r}{4 \cdot E^*}} \quad (2.46)$$

berechnen [54][S. 64]. Darin bezeichnet E^* das kombinierte Elastizitätsmodul der Werkstoffe. Dieses wird durch die Beziehung

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.47)$$

bestimmt [54][S. 65]. Hier bezeichnen E_1 und E_2 die E-Modulen der beiden unterschiedlichen Materialien, ν_1 und ν_2 , die für die Querkontraktionszahlen der Werkstoffe stehen.

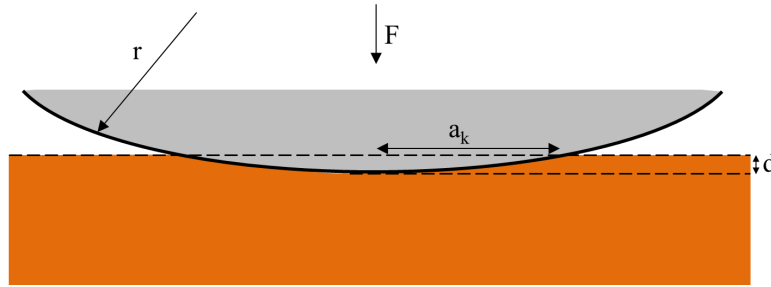


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung eines Kontaktmodells nach Hertz für den elastischen Kontakt [54][S. 64].

Plastischer Kontakt

Werden zwei Oberflächen mit einer Normalkraft zusammengebracht, entsteht eine Kontaktfläche A zwischen den Oberflächen in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit, der Härte der beteiligten Materialien, und der Oberflächenstruktur. Wird nun eine kugelförmige Oberfläche in eine glatte Ebene gedrückt, lässt sich die entstandene Kontaktfläche nach Gl. 2.48 durch das Verhältnis der normalen Kraft F_N zum mittleren Druck \bar{p} des weicheren Materials beschreiben. Die Härte wird als der Widerstand eines Werkstoffs gegen das Eindringen eines härteren Körpers in die Oberfläche bezeichnet [54][S. 92].

$$A_w = \frac{F_N}{\bar{p}} \quad (2.48)$$

Bei Eindringen der kugelförmigen Oberfläche in die glatten Ebenen entspricht der mittlere Druck der Kontakthärte. Bei der Pressung von Körpern können die Oberflächen auch elastisch verformt werden, daher ist die Verwendung von einem Korrekturfaktor notwendig, der als Elastizitätsfaktor bezeichnet wird.

2.3 Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems

$$\bar{p} = \xi \cdot H \quad (2.49)$$

ξ ist der Elastizitätsfaktor der eindringenden kugelförmigen Oberfläche und nimmt einen Wert zwischen 0,3 und 1 an.

Da ein Kontaktteil eine Kugelform besitzt, weist der Kontakt eine kreisförmige Fläche $\pi \cdot a^2$ mit dem Radius a auf. Dabei lässt sich Gl. 2.48 wie folgt ausdrücken:

$$A_w = \frac{F_N}{\xi \cdot H} = \pi \cdot a^2 \quad (2.50)$$

Wird Gl. 2.50 nach dem Radius a aufgelöst, ergibt sich der Radius der mechanischen Kontaktfläche a_m für einen plastischen Kontakt mit:

$$a_{\text{mech}} = \sqrt{\frac{F_N}{\xi \cdot H \cdot \pi}} \quad (2.51)$$

2.3.5 Temperaturanstieg in Abhängigkeit der Zeit aufgrund der Rotationsbewegung

In diesem Abschnitt wird auf die graphische Lösung nach HOLM zur Berechnung des Temperaturanstiegs in der Bürste, sowie in der Kommutatoroberfläche eingegangen. Die Berechnungen basieren auf der allgemeinen Gleichung der Wärmeleitung (Gl. 2.52). Des Weiteren gilt die Annahme, dass der Kontakt eine ebene kreisrunde Form hat.

Die zeitabhängige Erwärmung eines Körpers lässt sich mit der allgemeinen Formel

$$\lambda \cdot \nabla^2 \vartheta + \rho \cdot J^2 = c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (2.52)$$

berechnen. Hierbei ist λ die Wärmeleitfähigkeit, $\nabla^2 \vartheta$ der Laplace-Operator, ρ der spezifische Widerstand, J die Stromdichte und c die Wärmespeicherzahl.

Eine weitere Annahme ist, dass der elektrische spezifische Widerstand und die Wärmeleitfähigkeit temperaturunabhängig sind. HOLM [51][S. 97] löst die Gl. 2.52 mittels eines dimensionslosen Parameters z auf:

$$z = \frac{\lambda}{c \cdot a^2} \cdot t \quad (2.53)$$

c entspricht der Wärmespeicherzahl, λ der Wärmeleitfähigkeit, a dem Radius der Kontaktfläche und t der mittleren Kontaktzeit.

Die graphische Lösung, die sich zum Kohlebürste-Kommutator-System eignet, ist in Abb. 2.15 dargestellt. $f(z)$ stellt die Verhältnisse des Temperaturanstiegs zum Zeitpunkt t zu dem berechneten Temperaturanstieg im stationären Kontakt in Abhängigkeit der dimensionslosen Zeit z dar. Abb. 2.15 zeigt drei Kurven, die wie folgend definiert sind.

- *Kurve a:* T_{ϑ_s} ist aufgrund der elektrischen Wärme der mittlere Temperaturanstieg in der Kommutatoroberfläche in einem beweglichen Kontaktpunkt.
- *Kurve b:* T_{θ_s} ist aufgrund der Stromwärme der maximale Temperaturanstieg in der Kohlebürste.

2 Grundlagen

- *Kurve c*: $T_{\vartheta r}$ ist aufgrund der Reibungswärme der Temperaturanstieg in der Kommutatoroberfläche.

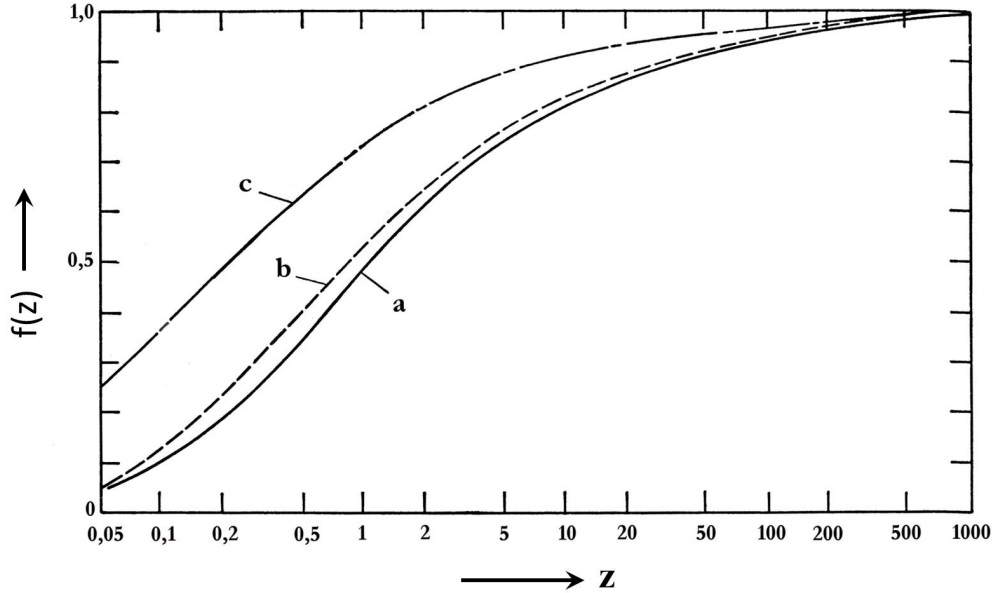


Abbildung 2.15: Graphische Lösung zum mittleren Temperaturanstieg des beweglichen Kontaktsystems. *Kurve a* stellt den Temperaturanstieg in der Kommutatoroberfläche dar. *Kurve b* entspricht dem maximalen Temperaturanstieg in der Kohlebürste aufgrund der Stromwärme. *Kurve c* zeigt den Temperaturanstieg in der Kommutatoroberfläche aufgrund der Reibungswärme (nach [52][S. 148]).

Um die Zeit zu berechnen, ist die Kontaktzeit t , sowie der Radius der elektrischen Kontaktfläche a_{el} erforderlich. Für die Berechnung des Radius einer Kontaktfläche mit n Anzahl von Strombrücken wird in HOLM [51][S. 21] die Formel des Engewiderstands benötigt:

$$R_E = \frac{\rho}{4 \cdot n \cdot a_{el}} \quad (2.54)$$

Die Gleichung enthält die Annahme, dass alle Strombrücken dieselben Radien haben und ausreichend voneinander entfernt sind, sodass keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Für eine weitere Vereinfachung wird angenommen, dass der Engewiderstand R_E des Kohlenstoffs dem Kontaktwiderstand R_K entspricht.

$$R_E = R_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{\rho}{4 \cdot n \cdot a_{el}} \quad (2.55)$$

Der Radius der elektrischen Kontaktfläche a_{el} berechnet sich:

$$a_{el} = \frac{\rho_C \cdot I_K}{4 \cdot n \cdot U_K} \quad (2.56)$$

Hierbei ist I_K der Kontaktstrom, U_K die Kontaktspannung und ρ der spezifische elektrische

2.3 Kontakttemperatur des Kohlebürste-Kommutator-Systems

Widerstand der Bürste.

Die Zeit, welche zur Wärmeübertragung von Kohlenstoff zu Kupfer benötigt wird, wird als die mittlere Kontaktzeit \bar{t} der Strombrücken bezeichnet. Die Kontaktzeit ist nach SHOBERT definiert [51][S. 99]:

$$\bar{t} = \frac{\pi \cdot a_{\text{el}} \cdot k}{2 \cdot v}, \quad (2.57)$$

wobei a_{el} der Radius der elektrischen Kontaktfläche, v die Geschwindigkeit und k ein Korrekturfaktor ist, für welchen SHOBERT den Wert 5 annimmt. Durch die Drehbewegung des Kommutators wirkt zusätzlich zur Druckspannung eine Zugspannung im Kontakt. Als Folge dehnen sich die Kontaktflächen in Drehbewegung aus.

Die zeitabhängigen Temperaturen lassen sich durch das Produkt der berechneten Temperatur im stationären Fall mit $f(z)$ berechnen.

$$T_{\vartheta, \text{t}} = f(z) \cdot T_{\vartheta} \quad (2.58)$$

Die maximale Temperatur in der Kommutatoroberfläche ergibt sich dann analog:

$$T_{\vartheta \text{ges}} = T_{\vartheta \text{s}} + T_{\text{rt}} \quad (2.59)$$

Gl. 2.59 wird in Kapitel 3 verwendet, um die Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Materialorientierung zu berechnen. Um den Einfluss der Materialorientierung der Kohlebürsten auf die Kontakterwärmung zu untersuchen, wird das Model in Kapitel 3 entsprechend erweitert. Des Weiteren werden die berechneten Temperaturen mit den Messungen der Prüfstandsversuche verglichen und diskutiert.

2.4 Messmethoden

In diesem Abschnitt wird sowohl auf den Versuchsaufbau der durchgeführten Versuche, als auch auf die angewendete Analytik eingegangen. Die tribologischen Versuche dieser Arbeit wurden an zwei unterschiedlichen Prüfständen durchgeführt. Der Kommutator-Bürste-Prüfstand (KBP), der von Firma Robert Bosch GmbH zur Verfügung gestellt wurde, dient zur Messung von Reibung und Verschleiß ohne Kommutierungsstrom. Der Dauerlaufprüfstand, der während dieser Arbeit vollständig aufgebaut wurde, hingegen ermöglicht Triboversuche mit Kommutierungsstrom in realen Elektromotoren. Des Weiteren wurden unterschiedliche analytische Methoden eingesetzt, um die erzeugten Reibkontakte zu charakterisieren.

2.4.1 Aufbau eines Kohlebürstenprüfstands

Um die Reibung und den Verschleiß des tribologischen Motorsystems (Bürste-Kommutator) in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen und ohne Kommutierungsstrom zu untersuchen, kam ein Bürste-Kommutator-Prüfstand (KBP) zum Einsatz. Ein Schema des KBP ist in Abb. (2.16) dargestellt.

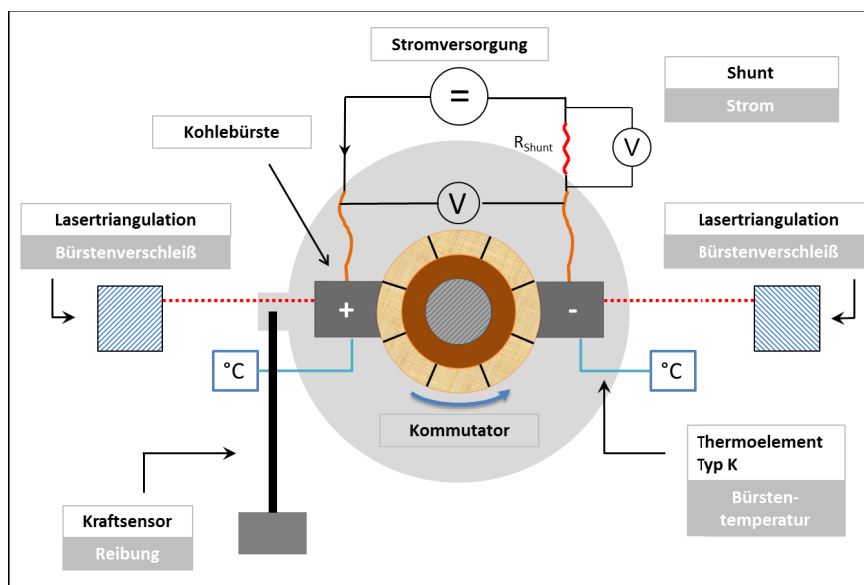


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Aufbaus des Kohlebürstenprüfstands (KBP).

Das zentrale Element des Prüfstands bildet der Kommutator, welcher sich auf einer angetriebenen Welle befindet. Für die tribologischen Messungen ohne elektrischer Strom ist dieser mit einem Draht kurzgeschlossen. Angetrieben wird das System durch einen geregelten Elektromotor, welcher über eine Kupplung die Kraftübertragung realisiert. Gegen den rotierenden Kommutator drücken die Bürsten, welche sich in einem entsprechenden Bürstenhalter befinden. Eine Feder hinter der jeweiligen Bürste sorgt für den nötigen Anpressdruck. Die Bürstenhalter wiederum sind an einer drehbar gelagerten Scheibe befestigt, welche sich auf einer Seite an einem Kraftsensor abstützt. Durch diese Konstruktion kann das Drehmoment gemessen werden.

Die Messkomponenten des KBP bestehen aus dem Kraftsensor für die Ermittlung des Reibkoeffizienten, zwei Lasertriangulationssensoren für die Messung des Bürstenverschleißes, einem Shunt für Strommessung und den Thermoelementen vom Typ K für die Messung der Bürstentemperaturen (siehe Abb. .2.16). Die Bürsten werden mithilfe eines Netzteils der Firma Delta Power Supply bestromt. Der Sollstrom kann dabei über das Labview-Programm im Bereich von 1 bis 70 A eingestellt werden. Dieser Strom wird von der positiven Bürste über den Kommutator zur negativen Bürste geleitet, wodurch der Spannungsabfall über den Kohlebürsten gemessen werden kann.

Verschleißmessung der Kohlebürste

Die Verschleißmessung der Bürsten während des Versuchs erfolgt mithilfe von laseroptischen Wegsensoren von Firma Mikro-Epsilon Messtechnik. Der Lasersensor besteht aus einer Laserquelle, einem Detektor und einer Linse. Die Bürstenrückseite wird bei diesem Messsystem mit dem Laserstrahl fokussiert (siehe Abb. .2.16). Die Reflexion des Lasers trifft unter einem bestimmten Winkel auf den Detektor. Aus der Position des Laserpunktes auf dem Detektor bzw. der auftretenden Winkeländerung wird die Entfernung der Bürste zum Laser errechnet. Während der Reibung der Bürsten auf dem Kommutator verschleißt die Kohlebürste gleichmäßig und somit nimmt der gemessene Abstand vom Laser zur Bürstenrückseite zu. Das wird wiederum als Verschleißsignal interpretiert. Abb. 2.17 zeigt eine schematische Darstellung der Verschleißmessung der Kohlebürste am KBP.

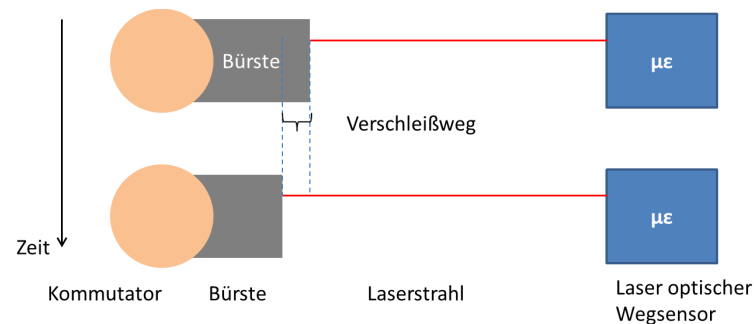


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der Verschleißmessung der Kohlebürste

Die durch die Stromverluste, sowie durch Reibung entstehende Wärme beeinflusst die Verschleißmessung aufgrund der thermischen Längsausdehnung der Bürsten, sowie des Kommutators. Zu Beginn der Messung verkürzt sich aufgrunddessen der Abstand zur Bürstenrückseite, da die im System freigesetzte Wärmemenge zur thermischen Ausdehnung der Kontaktpartner führt. Nachdem sich die Systemtemperatur einem stabilen Zustand angenähert hat, fängt der Abstand zwischen Laser und Bürstenrückseite aufgrund des Bürsten- und Kommutator-Verschleißes an zu steigen. Das Ermitteln der Verschleißrate der Bürsten erfolgt anschließend nach der Formel 2.60 durch das Verhältnis der Differenz zweier Verschleißabstände zu einem ausgewählten Zeitintervall. Dies wird in Abb. 2.18 dargestellt. Das Zeitintervall wird anhand des Temperatursignals festgelegt, indem ein Bereich mit möglichst stabilem Temperaturverlauf ausgewählt wird. Anschließend wird das Verschleißsignal mit einer linearen Fit-Funktion angenähert. Die Steigung der berechneten Geradengleichung entspricht der Verschleißrate der Bürste.

$$\dot{w} = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (2.60)$$

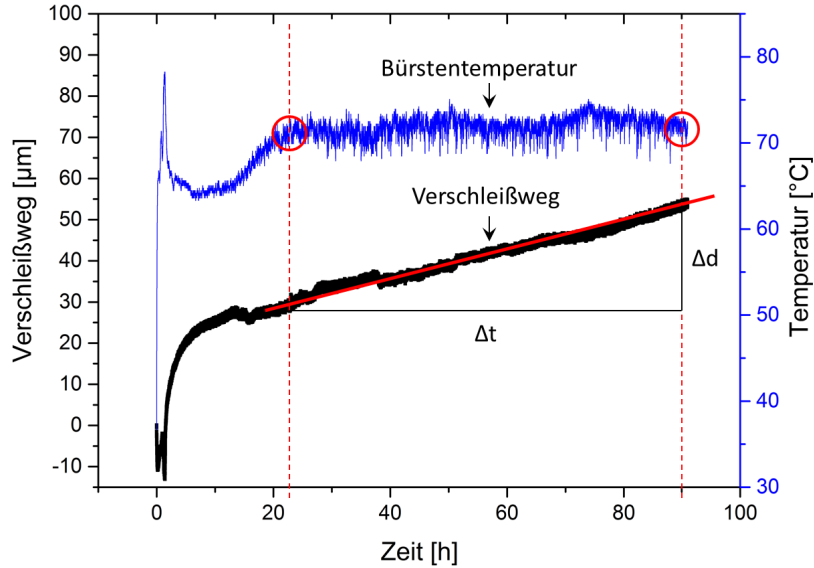


Abbildung 2.18: Ermittlung des Bürstenverschleißes anhand des gemessenen Verschleißwegs und der Temperatur.

Verschleißmessung des Kommutators

Der Verschleiß des Kommutators wurde nach dem Versuchsende mithilfe der Konfokalmikroskopie gemessen (siehe 2.4.3.1). Dabei wurde die komplette Lamelle senkrecht zur Laufrichtung aufgenommen. Eine Aufnahme einer gelaufenen Lamelle wird in Abb. 2.19 gezeigt. Der Höhenunterschied zwischen der ungelaufenen Lamellenseite (rote Linie) und der gelaufenen Fläche (blaues Rechteck) wird gemittelt und als Verschleiß der Lamelle interpretiert.

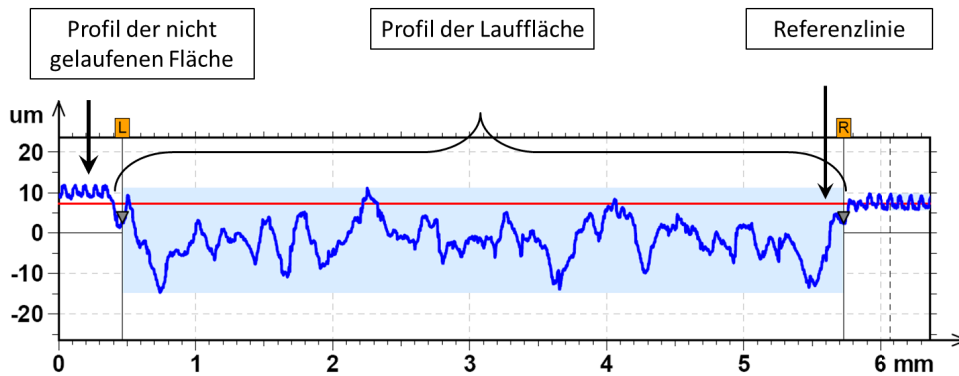


Abbildung 2.19: Ermittlung des Kommutatorsverschleißes mittels Konfokalmikroskops.

Reibkoeffizient

Abb. 2.20 stellt die auf das tribologische System wirkenden Kräfte dar. Der Reibkoeffizient errechnet sich nach der Formel 2.63 durch das gemessene Drehmoment M und die Federkraft bzw. die Anpresskraft $F_{\text{Bürste}}$ der Bürsten.

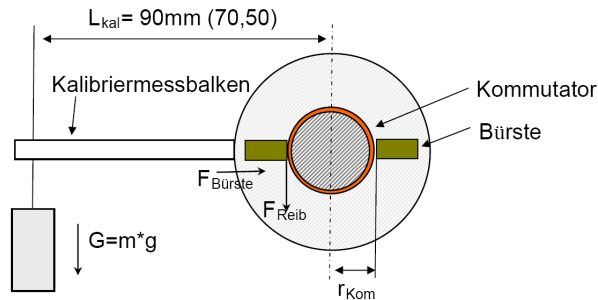


Abbildung 2.20: Ermittlung des Reibkoeffizienten aus dem Drehmoment.

$$M = n \cdot F_{\text{Reib}} \cdot r_{\text{Kom}} \quad (2.61)$$

$$M = n \cdot \mu \cdot F_{\text{Bürste}} \cdot r_{\text{Kom}} \quad (2.62)$$

$$\mu = \frac{M}{n \cdot r_{\text{Kom}} \cdot F_{\text{Bürste}}} = \frac{F_{\text{Reib}} \cdot l_{\text{Kal}}}{n \cdot r_{\text{Kom}} \cdot F_{\text{Bürste}}} \quad (2.63)$$

F_{Reib} : Reibkraft, wird aus dem gemessenen Drehmoment ermittelt

l_{Kal} : Abstand von der Kommutatormitte bis zum Kraftsensor

n : Anzahl der Bürsten

r_{Kom} : Radius des Kommutators

$F_{\text{Bürste}}$: Kraft der Bürstenfeder bzw. Anpresskraft

Bürstentemperaturen

Die Temperaturmessung erfolgte durch Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1 mm. Ein Thermoelement besteht dabei aus zwei dünnen Drähten unterschiedlich leitender Metalle, die an einem Ende verschweißt sind (Messstelle). Das Messprinzip ist in Abb. 2.21 schematisch dargestellt. An der verbundenen Stelle entsteht nach dem Seebeck-Effekt bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen eine Thermospannung bis zu einigen mV [55]. Die offenen Enden der Anordnung sind mit einem Messgerät (Vergleichsstelle mit definierter Temperatur) verbunden.

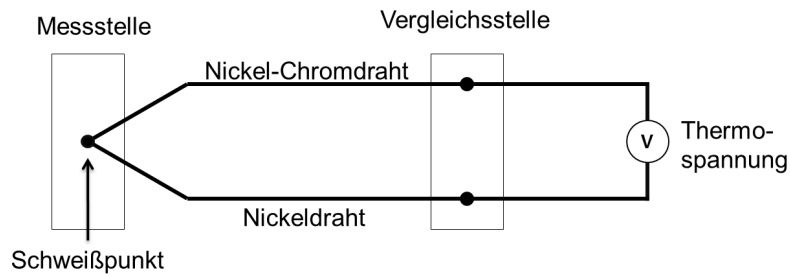


Abbildung 2.21: Temperaturmessprinzip des Thermoelements.

2.4.2 Dauerlauf-Prüfstand

Um die Elektromotoren mit gezielten Variationsparametern für eine Versuchsdauer von über 650 Stunden zu untersuchen, wurde in dieser Arbeit ein Dauerlaufprüfstand (DLP) konzipiert und entwickelt. Mit dem DLP können drei Gleichstrommotoren gleichzeitig betrieben werden. Abb. 2.22 stellt das Schema des Dauerlaufprüfstands dar. Die Messeinrichtung des DLPs besteht aus drei Shunts, drei induktiven Hallsensoren und einer Spannungsquelle. Die Shunts weisen einen Wert von $1\text{ m}\Omega$ auf und dienen zur Strommessung der Elektromotoren. Mit den induktiven Hallsensoren werden die Drehzahlen der Elektromotoren aufgenommen. Zur Erzeugung einer Motorenlast wurde jeweils ein Lüfterrad verwendet. Das Lüfterrad ist an einer Welle befestigt und diese ist mit den Motorenwellen über eine Kupplung verbunden. Die Messgrößen werden mithilfe einer Messkarte von National Instruments synchron erfasst und diese in Labview visualisiert.

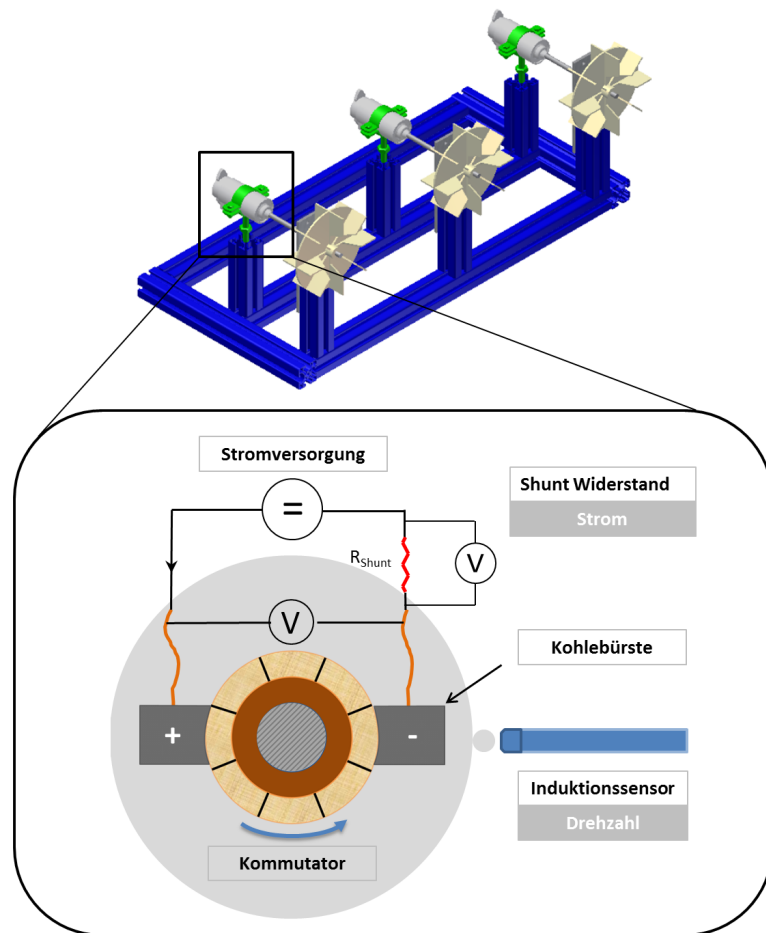


Abbildung 2.22: Aufbau und Messprinzip des Dauerlaufprüfstands.

2.4.3 Analytik

Die in dieser Arbeit eingesetzten analytischen Verfahren dienen zum Untersuchen der am Prüfstand gelaufenen Bürsten und Kommutatorlamellen. Dabei wurde die Probenoberfläche bezüglich Form, Struktur und Morphologie mittels Lichtmikroskopie, Konfokalmikroskopie, sowie Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Die chemische Zusammensetzung und der Bindungszustand der Bürsten- und Kommutatoroberfläche wurden durch Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) und energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX) ermittelt. Die Dicke der Patina, sowie das Gefüge konnten mittels Präparation durch fokussierten Ionenstrahl (FIB) und anschließender Aufnahme mit dem Raster-Elektronen-Mikroskops (REM) untersucht werden. Das Gefüge der Kohlebürsten wurde durch den metallographischen Schliff analysiert. Des Weiteren wurde für die Bestimmung der Härte der Bürsten ein Druckversuch durchgeführt. Letztendlich wurde der elektrische Widerstand der Kohlebürste durch das Wirbelstromverfahren gemessen.

2.4.3.1 Konfokalmikroskopie

Zur Messung der Oberflächenrauheiten der Proben wurde das Konfokalmikroskop Plμ 2300 der Firma Sensofar verwendet. Konfokalmikroskopie ist eine optische Methode, die eine dreidimensionale berührungslose Vermessung von rauen Oberflächen vom Nanometer- bis zum Mikrometerbereich ermöglichen kann. Der Aufbau des Konfokalmikroskops setzt sich aus einer Lichtquelle (Laser), einem Strahlteiler, einem Detektor und zwei Lochblenden zusammen. Das Messprinzip ist in Abb. 2.23 dargestellt. Das von der Lichtquelle ausgehende Licht wird mit Hilfe eines Strahlteilers durch ein Objektiv in der Messebene fokussiert. Das von der Oberfläche rückgestreute Licht wird vom Objektiv gebündelt und mit einem Strahlteiler an dem Lichtdetektor durch eine Lochblende geleitet. Die Lochblende lässt nur Licht aus dem Fokusbereich durch und unterdrückt das Licht aus dem unscharfen Bereich. Das Verschieben des Objekts entlang der Z-Achse und wiederholte Aufnahmen der einzelnen Ebenen ermöglichen die Erstellung eines dreidimensionalen Oberflächenprofils. Das Messgerät verfügt eine Auflösung von 10 nm in vertikaler und 0,8 μm in lateraler Richtung [56][S. 30]. Des Weiteren kann die komplette Probenoberfläche durch Verschiebung des Objekts in x-y-Richtung aufgenommen werden.

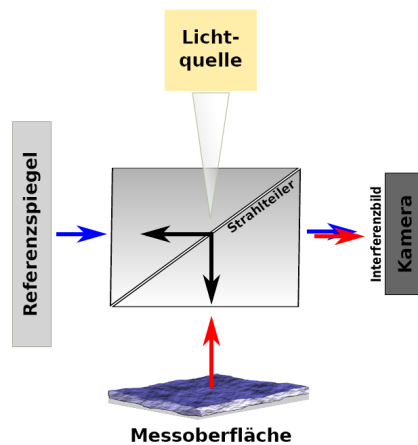


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung des Messprinzips von Konfokalmikroskopie [56].

2.4.3.2 Rasterelektronenmikroskopie und Energiedispersive-Röntgenspektroskopie

Das Rasterelektronenmikroskop ist ein häufig angewandtes Verfahren zur Vergrößerung bzw. Abbildung der Probenoberflächen mit hoher Auflösung im nm-Bereich. Für die Abbildung der Oberflächen wird ein Primärelektronenstrahl durch das Erhitzen eines Drahtes (z.B. Wolframdrahtes) erzeugt und durch eine Anode mit bis zu 30 kV beschleunigt. Die Probenoberfläche wird mit dem Primärelektronenstrahl zeilenförmig abgetastet, sodass Sekundärelektronen (engl.: secondary electrons SE), Rückstreuелеktronen (engl.: backscattered electrons BSE) und Röntgenstrahlung frei werden, die durch die Wechselwirkung der Elektronen des Primärstrahls mit den Atomen der Probe herausgelöst, bzw. gebildet werden. Die Sekundär-, sowie die Rückstreuungselektronen werden für die Abbildung der Oberfläche genutzt, während der Röntgenstrahl Informationen zur chemischen Zusammensetzung

der Probe liefern kann. Der Prozess findet im Hochvakuum statt, um die Streuung mit Luftmolekülen zu vermeiden.

Die Sekundärelektronen besitzen eine niedrige Energie bis 50 eV. Aufgrund ihrer niedrigen Energie können Sie unmittelbar aus der Oberflächenschicht emittieren und werden von einem In-Lens-Detektor registriert. Somit kann eine hochaufgelöste Abbildung der Probenoberfläche entstehen.

Die Rückstreuielektronen sind hochenergetische Elektronen und können aus einer Tiefe von bis zu 100 nm stammen [57][S. 116]. Die Intensität der Rückstreuielektronen hängt primär von der Ordnungszahl der Elemente und sekundär von dem Winkel der Probe zum Elektronenstrahl ab. Dies hat zur Folge, dass schwere Elemente, wie bspw. Kupfer, eine starke Rückstreuung aufweisen. Infolgedessen zeigt das entstandene Bild einen hellen Materialkontrast für die schweren Elemente.

Bei dem Energiedispersiven-Röntgenspektroskopie-Verfahren (EDX) wird der Röntgenstrahl als Informationsquelle genutzt. Dieser entsteht, wenn ein Elektron aus der inneren Atomschale herausgeschlagen wird. Ein Elektron aus einer äußeren Schale füllt dabei das entstandene Loch. Die Energiedifferenz zwischen den beteiligten Elektronenschalen wird als Energie in Form eines Röntgenstrahls emittiert. Die Energie jedes Röntgenquants wird von einem empfindlichen Detektor gemessen und in Elektron-Loch-Paare umgewandelt. Die Signalintensität, die von der Energie des Röntgenquants abhängig ist, wird in einem Spektrum der Energie aufgetragen. Die Auswertung des Spektrums gibt Informationen über die Elementzusammensetzung der Probenoberflächen [58][S. 51].

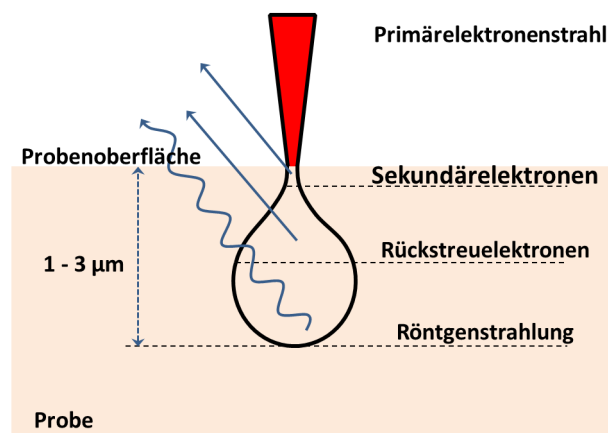


Abbildung 2.24: Schematische Darstellung der Interaktionen des Primärelektronenstrahls mit der Probe.

2.4.3.3 Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie

Die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie ist eine analytische Messmethode, die die chemische Zusammensetzung und den Bindungszustand der Elemente einer Materialprobe bestimmen kann. Mit diesem Verfahren können alle chemischen Elemente, außer Wasserstoff und Helium, bestimmt werden. Die eingesetzte XPS-Anlage wurde von der Firma Physical Electronics GmbH hergestellt. Die XPS-Messmethode beruht auf dem Photoeffekt. Die Oberfläche der Probe wird in einem Hochvakuum mit Röntgenstrahlung beschossen. Der Durchmesser des Strahls beträgt dabei 100 μm . Durch den Beschuss werden Photoelektro-

2 Grundlagen

nen aus kernnahen Bereichen der Atome emittiert und anschließend mit einem Detektor aufgenommen, der deren kinetische Energie E_{kin} bestimmt. Daraus wird nach der Formel 2.64 die Bindungsenergie E_{bin} der Elektronen:

$$E_{\text{kin}} = h\nu - E_{\text{bin}} \quad (2.64)$$

bestimmt, wobei $h\nu$ die Energie der Röntgenstrahlung und E_{kin} die gemessene kinetische Energie sind. Aus der Bindungsenergie und der Peak-Intensität der Photoelektronen können die Identität, der chemische Zustand und die Menge eines Elements bestimmt werden. Die Informationstiefe ist materialabhängig und kann bis zu 10 nm betragen. XPS-Messungen können in zwei unterschiedlichen Messmoden durchgeführt werden, die entweder ein Übersichtspektrum (*engl. wide scan*) oder ein Multiplexspektrum (*engl. narrow scan*) liefern. Das Übersichtspektrum gibt Information über die, an der zu untersuchenden Oberfläche existierenden chemischen Elemente. Das Multiplexspektrum liefert quantitative Aussagen über den chemischen Bindungszustand.

Für die XPS-Tiefenprofile wurden die Probenoberflächen mit monochromatischer Al-K α -Röntgenstrahlung mit 15 keV angeregt. Für die Erzeugung eines Tiefenprofils wurde Material durch den Einsatz einer Sputterquelle aus einem Argonionenstrahl mit einer Energie von 1-3 keV abgetragen. Die Kalibrierung der resultierenden Abtragsrate wurde dabei anhand einer 100 nm dicken Schicht aus Siliciumdioxid durchgeführt. Der erwartete Fehler bei der Übertragung der Abtragsrate auf andere Elemente kann bis zu 20 %, bezogen auf den Referenzwert, liegen. Die Messfläche betrug bei der Untersuchung $(750 \times 750) \mu\text{m}$ und beinhaltet somit die Grundtopographie der gelaufenen Proben. Die Sputtertiefe betrug bis zum 5 μm . Alle in dieser Arbeit mit XPS untersuchten Proben wurden vor der Analyse nicht gereinigt, um die empfindlichen Oberflächenstrukturen nicht zu entfernen, bzw. zu verfälschen (siehe 3.6.2 und 4.4.2.1).

2.4.3.4 Fokussierter Ionenstrahl

Zur Analyse des Probengefüges wurde in dieser Arbeit der fokussierte Ionenstrahl (FIB) Nova 200 von der Firma FEI verwendet. Der fokussierte Ionenstrahl ist eine Methode, die die Gefügestruktur einer Probe freilegt, welche im Anschluss mit einem Rasterelektronenmikroskop abgebildet wird. Dazu wird ein Schnitt mit einem hochenergetischen Strahl aus Galliumionen in die Oberfläche einer Probe gelegt. Bei der Bestrahlung der Oberfläche mit einem fokussierten Ionenstrahl werden Atome aus dem Kristallgitter herausgeschlagen. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis einige Mikrometer aus der Tiefe abgetragen sind. Um die Schnittkante zu schützen, wird eine Platinschicht auf die Oberfläche aufgetragen. Abschließend wird die entstandene Schnittfläche durch ein schräg zur Schnittfläche stehendes Rasterelektronenmikroskop abgebildet.

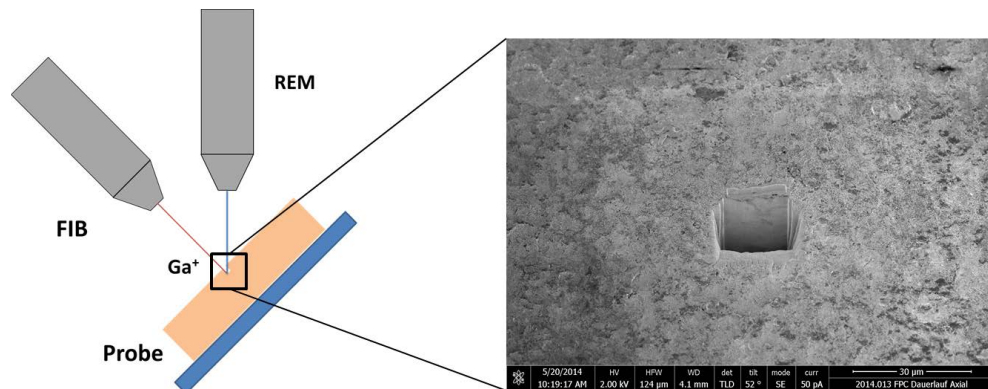


Abbildung 2.25: links: Messprinzip des fokussierten Ionenstrahls. Rechts: FIB-Schnitt einer Kommutator-Oberfläche.

2.4.3.5 Metallographischer Schliff

Der metallographische Schliff dient zur Untersuchung der Gefügestruktur einer Probe als Vorbereitung einer anschließenden mikroskopischen Analyse. Die Präparation erfolgt in verschiedenen Arbeitsschritten:

- Einbetten
- Schleifen und Polieren
- Ätzen

Zunächst wird die Probe ins Einbettmaterial gelegt. Anschließend wird die zu untersuchende Fläche der Probe mechanisch auf SiC-Papier geschliffen. Im darauffolgenden Arbeitsschritt wird die Probe mit einer Diamant- und feiner Tonerdesuspension poliert, um die zu untersuchende Fläche möglichst eben zu präparieren. Zur Unterscheidung der einzelnen Bestandteile des Gefüges wird ein Ätzprozess im letzten Präparationsschritt eingesetzt. Dabei werden die Gefügebestandteile je nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedlich stark angegriffen. Infolgedessen ändert sich das Reflexionsvermögen und macht die Körnerflächen unterscheidbar. Das Gefüge der Probe kann nun mit dem Mikroskop oder dem Rasterelektronenmikroskop untersucht werden.

2.4.3.6 Druckversuch

Der Einsatz des Druckversuchs dient zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit) der Bürste. Das mechanische Verhalten einer Bürste wird im Druckversuch unter statischen Belastungsbedingungen ermittelt. Hierzu wird die Bürste in Längsrichtung bis zum Bruch belastet. Zur möglichst weitgehenden Vermeidung lokaler Überlastungen im Andruckbereich durch fehlende Planparallelität der Probenoberflächen wurde ein Druckstempel mit Ausgleichskalotte verwendet. Die Prüfung erfolgte verschiebungskontrolliert in einer servohydraulischen Schenck PEZ 2221 Universalprüfmaschine mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min. Während des Versuchs wurden der Maschinenweg und die resultierende Kraft am Druckstempel kontinuierlich erfasst. Die Messergebnisse dieses Versuchs sind in Kapitel 5 Abb. 5.2 dargestellt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. (2.26) dargestellt.

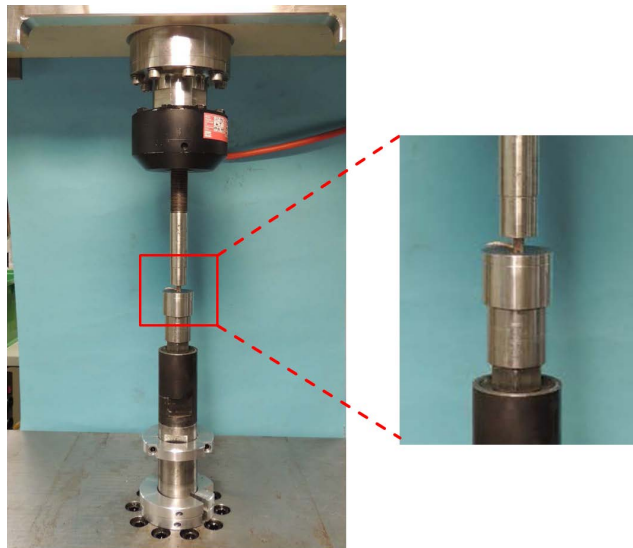


Abbildung 2.26: Aufbau eines Druckversuchs.

2.4.3.7 Wirbelstrommessung

Um den spezifischen Widerstand der Kohlebürste zu messen, wurde das Messgerät UMFECKMG5 von der Firma Robert Bosch GmbH verwendet. Der spezifische Widerstand einer leitenden Probe kann mit dem Wirbelstromverfahren, das auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion beruht, gemessen werden. Dabei wird durch eine an einer Wechselspannung angeschlossene Erregerspule ein Magnetfeld um diese erzeugt. Das induzierte Magnetfeld dringt in die Probe ein und verursacht Wirbelströme [59][S.358]. Die induzierten Ströme bilden wiederum ein elektromagnetisches Feld, welches von der Sensorspule erfasst wird. Aus der Stärke des rückwirkenden magnetischen Feldes wird der elektrische Widerstand der Probe ermittelt. Die Genauigkeit des Prüfstandes liegt bei $\pm 10\%$. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Kapitel 3, 4 und 5 dargestellt. Das Messprinzip der Wirbelstrommethode ist in Abb. (2.27) schematisch dargestellt. Abbildung 2.27 rechts zeigt eine schematische Darstellung zur Widerstandsmessung der in dieser Arbeit untersuchten Kohlenbürsten. Die Widerstandsmessungen wurden an den Bürstenseiten, bzw. parallel zur Kontaktfläche, durchgeführt.

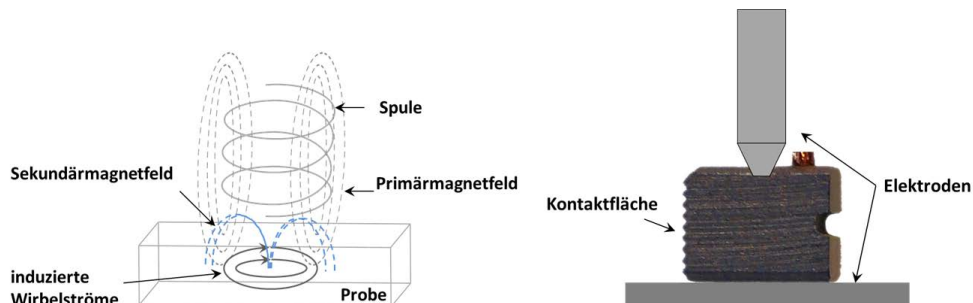


Abbildung 2.27: Schematische Darstellung des Wirbelstrommessprinzips.

3 Pressrichtung der Bürsten

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Materialorientierung der Kohlebürsten auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Kommutator-Kohlebürste-Systems untersucht und diskutiert. Bürstenmaterialien können während der Herstellung mit axialer, radialer und tangentialer Vorzugsrichtung gepresst werden. Zur Analyse des Bürstenzustands wird die Orientierung dreier unterschiedlicher Bürsten nach dem Pressvorgang durch einen metallographischen Schliff untersucht. Anschließend erfolgt die tribologische Charakterisierung der unterschiedlich orientierten Kohlebürsten durch Reibungs- und Verschleißmessungen am Kohlebürstenprüfstand KBP ohne Stromfluss. Weiterhin wird das Bürstenverhalten als Funktion der Pressrichtung im elektrisch leitenden Zustand geprüft. Um den realen Anwendungsfall abbilden zu können, werden die Bürsten zusätzlich in realen Motoren (mit Kommutierungsstrom) getestet. Weiterhin erfolgt eine Modifizierung der Bürstenoberflächen durch Festkörperbestrahlung, um eine tribologische Optimierung des oberflächennahen Bereichs zu erreichen. Das Kapitel wird abgeschlossen, indem ein Modell zur Berechnung der Kontakttemperatur vorgestellt und angewendet wird. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zum Gesamtverständnis mit einem Verschleißmodell korreliert.

3.1 Stand der Technik

In elektrischen Gleitkontakten spielt die Orientierung des Werkstoffs im Bezug zur Kontaktfläche eine entscheidende Rolle. Dabei sind eine niedrige Verschleißrate und eine gute elektrische Leitfähigkeit der Kontakte Zielparаметer. Aufgrund vorteilhafter mechanischer Eigenschaften wird für die trockene Gleitbewegung häufig Graphit eingesetzt. Graphit zählt aufgrund der leichten Abscherung entlang der Basalebenen zu den selbstschmierenden Werkstoffen [60][S. 226]. Des Weiteren weist Graphit, innerhalb der Basalebenen, eine gute elektrische Leitfähigkeit, sowie eine hohe mechanische Festigkeit auf. Für niedrige Stromverluste eignet sich die Orientierung der Graphitebenen senkrecht zur Kontaktfläche. Die mechanischen Eigenschaften des Graphits verbessern sich jedoch, wenn sich die Graphitlamellen parallel zur Kontaktfläche orientieren.

CSAPO et al. [61] untersuchten die Wirkung des Stroms auf die Orientierung des Werkstoffs zwischen den Graphitelektroden. Es wurde festgestellt, dass während der Reibung (ohne elektrischen Strom) die Orientierung der Graphitebenen unverändert parallel zur Gleitfläche bleibt. Sobald ein Strom erzeugt wurde, änderte sich die Orientierung der Graphitebenen senkrecht zur Kontaktfläche. Diese Beobachtung wurde sowohl mit Rasterkraftmikroskop (AFM), als auch mit Rastertunnelmikroskop (STM) nachgewiesen. Untersuchungen von SENOUCI et al. [29] zeigen, dass durch die Ausrichtung der Graphitebenen senkrecht zur Kupferoberfläche das Graphit einen abrasiven Verschleißprozess auf der Kupferoberfläche induziert. Die Begründung kann durch die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften beider Materialien gegeben werden. Das Elastizitätsmodul von rein monokristallinem Gra-

3 Pressrichtung der Bürsten

phit beträgt innerhalb der Schichtebene 1050 GPa [62][S. 37] und ist somit um das zehnfache höher, als das Elastizitätsmodul des Kupfers ($E = 110 \text{ GPa}$) [63][S. 55], wodurch das steifere Graphit durch die Kupferoberfläche pflügt.

SPREADBOROUGH [64] untersuchte die Schmiereigenschaften des polykristallinen Graphits. Er konnte gerolltes Graphitmaterial in der Reibspur nachweisen. Weiterhin wurde festgestellt, dass sich während der Reibung die Graphitkristallite parallel zur Oberfläche orientieren. Dieser Prozess wird von steigender Temperatur begünstigt. Durch eine Änderung der Graphitausrichtung an der Kontaktfläche können die Graphitlamellen ausscheren und durch die Gleitbewegung unter dem Reibkörper aufgerollt werden. Dadurch verbessert sich die Reibung der Kontaktkörper.

VOLKMANN [65] stellt fest, dass die Kohlebürsten durch eine Materialorientierung orthogonal zur Kontaktfläche den Kommutierungsstrom im Elektromotor verbessern können. Hierbei verlängert sich die Kommutierungszeit, welche zum vollständigen Kommutierungsprozess führt. Aus diesem Grund werden sogenannte Mehrschichtkohlebürsten oder Tandemkohlebürsten für eine gezielt längere Kommutierungszeit bei Motoren hoher Leistung eingesetzt.

3.2 Zielsetzung

Der Stand der Technik ermöglicht keine Aussage bezüglich der Materialorientierung der Kohlebürsten auf das Tribosystem des Gleichstrommotors mit kleiner Leistung. Daher sollen in dieser Arbeit die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kohlebürsten mit verschiedener Materialorientierung auf den Verschleiß des Tribosystems untersucht werden. Des Weiteren sollen die im System auftretenden Einflussfaktoren genauer analysiert und verstanden werden. Dazu werden Prüfstandversuche mit gezielt orientierten Bürsten durchgeführt werden, um anschließend in Verbindung mit analytischen Methoden ein Modell zu den auftretenden Verschleißmechanismen vorstellen zu können. Die Verminderung des Verschleißes von Kohlebürsten kann zur Steigerung der Leistung, der Lebensdauer und zu einer Verringerung der Baugröße, des Gewichtes und der Kosten des Elektromotors führen.

3.3 Probenkörper und Versuchsparameter

Als Grund- und Gegenkörper des Tribosystems kamen die Kohlebürsten, bzw. die Kupferkommutatoren zum Einsatz. Im folgenden Abschnitt werden die Eigenschaften der Tribopartner vorgestellt.

3.3.1 Kohlebürste

Abb. 3.1 links zeigt eine Kohlebürste mit einem Abmaß von $8 \times 6 \times 4 \text{ mm}$, welche durch eine Profilstruktur auf der Kontaktseite gekennzeichnet ist. An der Seite der Kohlebürste ist eine Kupferlitze zur Stromzufuhr hin angebracht. Die Rückseite der Kohlebürste beinhaltet eine Federnut, in der eine Feder beim tribologischen System eine definierte Normalkraft gegen die Bürste ausübt. In Abb. 3.1 rechts ist das Oberflächenprofil der Kontaktseite der Kohlebürste senkrecht zur Laufrichtung dargestellt. Die Kohlebürste besitzt eine Profilhöhe von $150 \mu\text{m}$

3.3 Probenkörper und Versuchsparameter

und einen arithmetischen Mittenrauwert R_a von $9\text{ }\mu\text{m}$. Der arithmetische Mittenrauwert R_a lässt sich nach Gl. 3.1 durch die Summe der einzelnen Flächen des Profils $z(x)$ innerhalb der Einzelmessstrecke l berechnen.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l (|z(x)|) dx \quad (3.1)$$

Die in diesem Kapitel vorgestellten Kohlebürsten weisen alle ein vergleichbares Profil auf. Sie unterscheiden sich nur in der Pressrichtung, bzw. in der Materialorientierung in Bezug zur Kontaktfläche. Die chemische Zusammensetzung der Kohlebürsten ist in Tabelle 3.1 dargestellt und steht stellvertretend für alle Orientierungen. Die Bürsten bestehen zum Großteil aus Graphit und beinhalten bis zu 49 Gew.-% zugesetztes Kupfer. Zu ihren Bestandteilen gehört Molybdändisulfid (MoS_2), welches als Festschmierstoff dient und in geringen Mengen (1 - 1,5 Gew.-%) hinzugefügt wird.

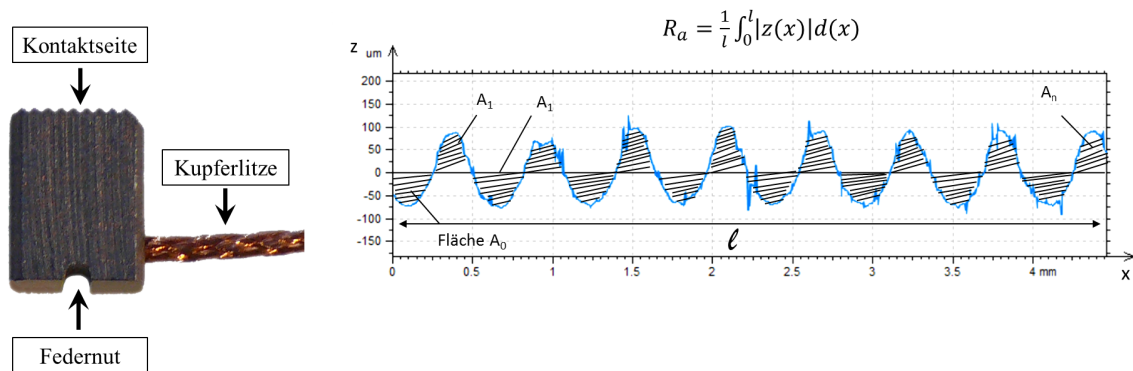


Abbildung 3.1: Kohlebürste mit dazugehörigem Profilschnitt. Links: Bild einer Kohlebürste. Rechts: Konfokalaufnahme der Kontaktoberfläche einer ungelaufenen Kohlebürste senkrecht zur Laufrichtung.

Element	C	Cu	MoS_2	Rest
Gew.-%	ca. 50 % Naturgraphit	45 - 49 %	1,0 - 1,5 %	0,4 - 0,8 %

Tabelle 3.1: Chemische Zusammensetzung einer Kohlebürste.

3.3.2 Kommutator

Abb. 3.2 links zeigt das Bild eines Kommutators. Er besteht aus 8 Kupferlamellen und besitzt einen Durchmesser von 10 mm. Eine Lamelle besitzt eine Länge von 9 mm und eine Breite von 4 mm. Durch die Endbearbeitung des Kommutators entsteht ein Oberflächenprofil, dessen Struktur in Abb. 3.2 rechts gezeigt ist. Die Oberfläche weist eine Profilhöhe von $2,75\text{ }\mu\text{m}$ und eine mittlere Rauheit R_a von ca. $1\text{ }\mu\text{m}$ auf.

3 Pressrichtung der Bürsten

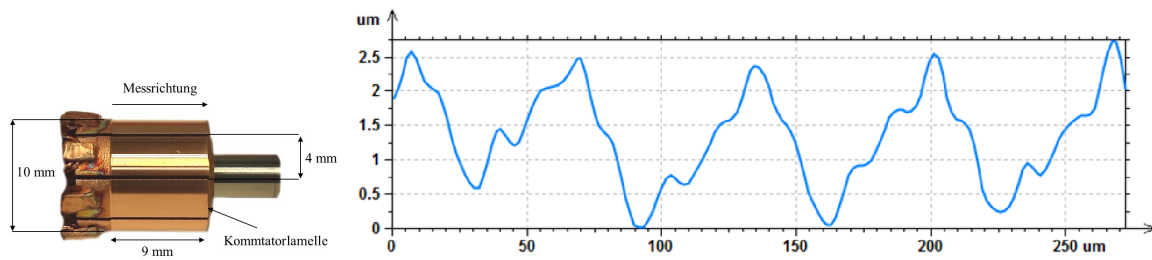


Abbildung 3.2: Kommutator mit dazugehörigem Profilschnitt. Links: Bild eines Kommutators mit entfernten Ankerspulen. Rechts: Abschnitt einer Konfokalaufnahme (senkrecht zur Laufrichtung) von einer ungelauten Kommutatoroberfläche.

3.3.3 Versuchsparameter

Die Versuche wurden am Kohlebürstenprüfstand (KBP, siehe Abschnitt 2.4.1) und am Dauerlaufprüfstand (DLP, siehe Abschnitt 2.4.2) durchgeführt. Für jeden Prüfstand sind ausgewählte Versuchsparameter definiert, die in Tabelle 3.2 und in Tabelle 3.3 dargestellt sind.

Parameter	Strom I	Drehzahl n	Federkraft F_N	Versuchszeit t
Wert	4 A	2000 min^{-1}	3 N	140 h

Tabelle 3.2: KBP-Parameter für die Versuche mit entfernten Ankerspulen.

Parameter	Spannung U	Federkraft F_N	Versuchszeit t	Messzyklus	
Wert	12 V	3 N	720 h	10 sek An	60 sek Aus

Tabelle 3.3: DLP-Parameter für die Dauerlaufversuche von kompletten Motoren.

3.4 Gefügeanalyse der Kohlebürsten mit verschiedenen Pressrichtungen

Die Form des zulegierten Kupfers konnte durch REM-Aufnahmen sichtbar gemacht werden (Abb. 3.3). Im vorliegenden Fall liegt Kupfer in Plättchenform vor. Diese bestehen aus dünnen Scheiben, deren Dicke im Nanometerbereich liegt. In den Kupferscheiben sind vereinzelte Poren erkennbar.

3.4 Gefügeanalyse der Kohlebürsten mit verschiedenen Pressrichtungen

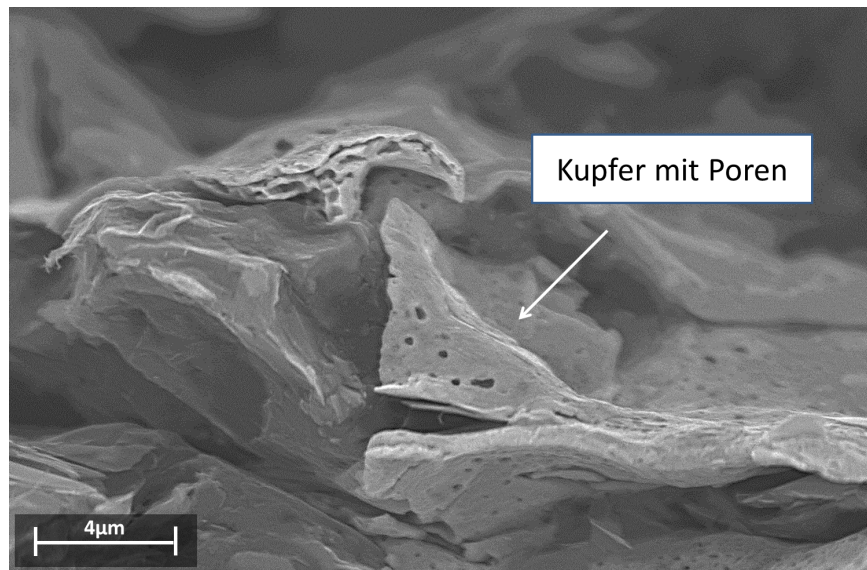


Abbildung 3.3: Kupfer als Metallzusatz in einem Bürstenkörper.

Die Untersuchung der Materialausrichtung der einzelnen Pressrichtungen erfolgte durch einen metallographischen Schliff an der Bürstenseite. Diese Untersuchung wurde an drei Bürsten jeweils die axiale, radiale und tangential Pressrichtung durchgeführt. Die Durchführung des Schliffprozesses ist im Kapitel 2 Abschnitt 2.4.3.5 erläutert. Die REM-Bilder der geschliffenen axialen, radialen und tangentialen Kohlebürsten sind in Abb. 3.4 a, b und c (linke Spalte) dargestellt. Die rechte Spalte präsentiert die schematische Darstellung der Soll-Ausrichtung des Materials entsprechend des Pressvorgangs. Die Kontaktseite zur Kommutatorlamelle befindet sich an der unteren Bildseite. Die REM-Aufnahmen von allen Bürsten zeigen dunklere und hellere Bildbereiche unterschiedlicher Struktur. Wie im Abschnitt 2.4.3.2 beschrieben ist, produzieren schwere Elemente eine starke Rückstreuung und werden somit als helle Bereiche abgebildet. Das Gefüge der Kohlebürste setzt sich folglich aus dunklen (Graphit), sowie aus hellen Bereichen (Kupfer) zusammen. In den Bereichen mit runder Form dominiert Graphit die Zusammensetzung des Gefüges. Die verbindenden Kupferpartikel weisen hingegen keine definierte Form auf. Abb. 3.5 a stellt eine 500-fache Vergrößerung der REM-Aufnahmen aus Abb. 3.4 a dar. In Abb. 3.5 b ist eine 5000-fache Vergrößerung des in Abb. 3.5 a markierten Bereichs dargestellt.

In Abb. 3.4 a ist eine Ausrichtung der Kupferpartikel senkrecht zur Kontaktfläche und senkrecht zur Pressrichtung zu erkennen. In den dunklen Graphitbereichen kann in Abb. 3.5 links eine Unterstruktur erkannt werden. Hierbei ist keine definierte Ausrichtung der Graphitlagen zu erkennen, obwohl eine grobe Vorzugsrichtung in senkrechter Orientierung zur Pressrichtung ausgemacht werden kann. Des Weiteren sind die Kupferpartikel in unterschiedlichen Größen sichtbar. Die Unterstruktur der größeren Graphitplatten zeigt in Abb. 3.5 rechts den lamellaren Aufbau einzelner Schichten. Die gesamte Dicke der Graphitplatten beträgt 10 µm. Bei der radial gepressten Bürste (Abb. 3.4 b) zeigen die Kupferpartikel eine Vorzugsrichtung parallel zur Lauffläche (untere Bildseite). Die ausgerichtete Struktur ist durch grobe Graphitzonen unterbrochen. Abb. 3.4 c zeigt die REM-Aufnahme einer tangentialen Bürste, deren Werkstoff senkrecht zur Kontaktfläche ausgerichtet sein sollte. Die Ausrichtung des Kupfers lässt sich aufgrund der überwiegend runden Partikelform nicht sicher definieren.

3 Pressrichtung der Bürsten

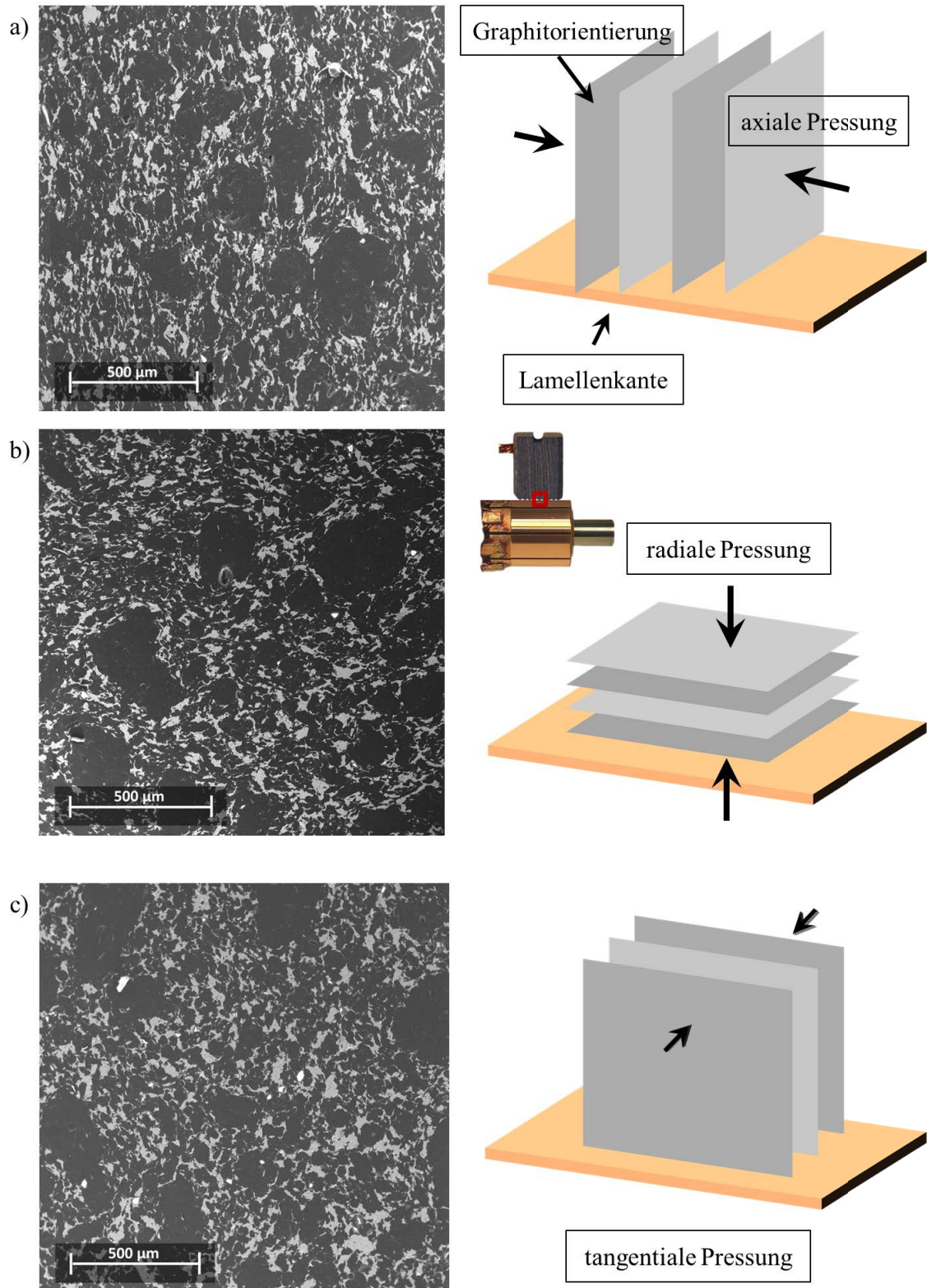


Abbildung 3.4: REM-Aufnahmen von geschliffenen Kohlebürsten. Der Schliff erfolgte an der Bürstenseite. Rechts ist die schematische Darstellung der Materialausrichtung entsprechend der jeweiligen Pressrichtung dargestellt.

3.4 Gefügeanalyse der Kohlebürsten mit verschiedenen Pressrichtungen

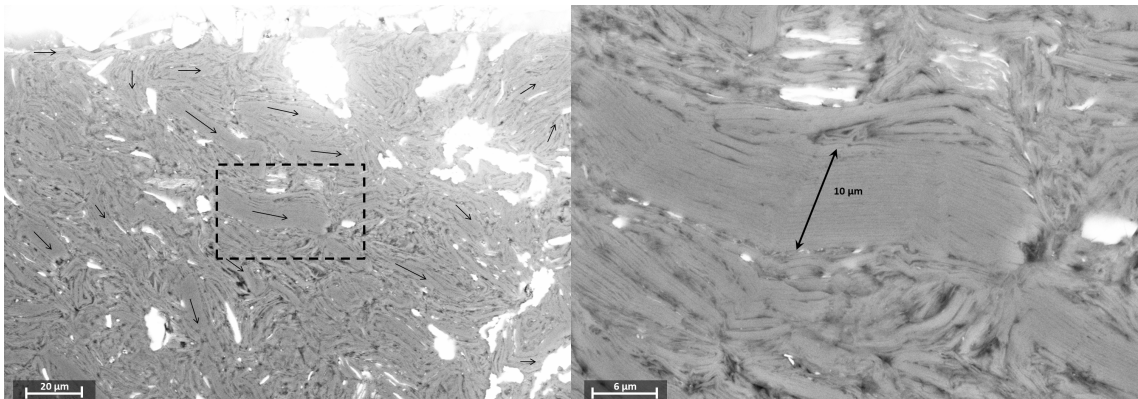


Abbildung 3.5: Vergrößerte REM-Aufnahmen der axial gepressten Bürste. Links: 500-fache Vergrößerung. Die Kontaktseite befindet sich auf der linken Bildseite. Rechts: 5000-fache Vergrößerung des markierten Bereichs. Die Stapelung von dünnen Graphitebenen ist zu erkennen.

3.4.1 Spezifischer elektrischer Widerstand

Aufgrund ihrer Anisotropie wird der elektrische Widerstand der Bürsten gemessen. In Abb. 3.6 werden zwei Bürstenwiderstände R_Q und R_L einer radial gepressten Bürste im Kurzschlusszustand abgebildet. Der Bürstenquerwiderstand R_Q verläuft quer zum Bürstenkörper, bzw. parallel zur Kontaktfläche. Der Längswiderstand R_L verläuft jedoch in Richtung des Stromflusses von der Bürstenlitze zur Kontaktfläche.

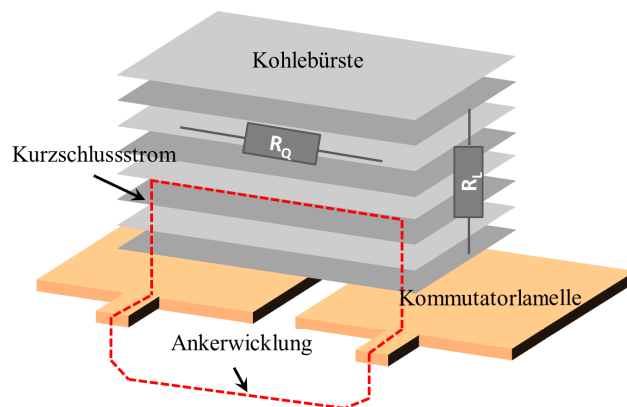


Abbildung 3.6: Anisotropische Eigenschaft der Kohlebürste. Darstellung des Längs- und Querwiderstands innerhalb der Kohlebürste mit radialer Pressung.

In Tabelle 3.4 sind die gemessenen spezifischen Widerstände mittels Wirbelstromverfahren dargestellt. R_Q und R_L sind von der Materialorientierung der Bürsten abhängig. Der spezifische elektrische Widerstand der Kohlebürste hängt von der Materialorientierung ab. Liegt die Orientierung senkrecht zur Messrichtung, resultiert dies in einem hohen Widerstand. Hingegen wird die Kohlebürste um 90° gedreht, zeigen die Messrichtung und die Materialorientierung in die gleiche Richtung. Dadurch verringert sich der Widerstand der Bürste. Bei der radialen Bürste ist $R_Q < R_L$ und bei den axialen und tangentialen Bürsten ist $R_Q > R_L$. Hierbei liegt der spezifische Bürstenquerwiderstand bei $1,3 \mu\Omega \cdot \text{m}$ und der Längswiderstand bei $0,7 \mu\Omega \cdot \text{m}$.

3 Pressrichtung der Bürsten

	axial	radial	tangential
spezifischer Querwiderstand R_Q	$1,3\mu\Omega m$	$0,7\mu\Omega m$	$1,3\mu\Omega m$
spezifischer Längswiderstand R_L	$0,7\mu\Omega m$	$1,3\mu\Omega m$	$0,7\mu\Omega m$

Tabelle 3.4: Spezifisch elektrischer Widerstand der Kohlebürsten mit plättchenförmigen Kupferzusätzen.

3.5 Stromlose Versuche ohne Kommutierungsstrom

Um den Einfluss der Orientierung des Bürstenwerkstoffs auf mechanischen Verschleiß hinzu untersuchen, wurden stromlose Reibungsversuche ($I = 0$ A) für 140 Stunden bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} durchgeführt. Bei diesen Versuchen werden die Ankerspulen von dem Kommutator entfernt, um den Effekt des Kommutierungsstroms auf das Tribosystem zu verdeutlichen. Für die tribologischen Versuche sind somit nur die Bürsten und der Kommutator (ohne Ankerspule) relevant. Dadurch werden nur der mechanische Verschleiß und die Reibungswärme gemessen werden.

3.5.1 Verschleiß und Reibungswärme

Um ein gleichmäßiges Oberflächenprofil (Rauheit) der Probenoberflächen zu erhalten und somit die Kontaktfläche zwischen der Kohlebürste und dem Kommutator zu vergrößern, wurde für einen optimalen Versuchsstart das Oberflächenprofil der Kohlebürsten mit feinem Schleifpapier bearbeitet. Dazu wurde das Schleifpapier auf einen Kommutator geklebt und mit niedriger Drehzahl ($n = 200 \text{ min}^{-1}$) auf der jeweiligen Kohlebürste geschliffen, bis sich das Oberflächenprofil vollständig angepasst hat. Anschließend wurden die geschliffenen Kohlebürsten auf einem neuen Kommutator für 140 Stunden getestet. Die Versuchsparameter können Tabelle 3.2 entnommen werden. Bei diesen Versuchen wird jeweils die Pressrichtung der drei Kohlebürsten untersucht.

In Abb. 3.7 sind die Verläufe der Reibungskoeffizienten der Reibungsversuche jeweils mit axialen, radialen und tangentialen Bürsten, sowie die gemittelten Verschleißraten der Kohlebürsten nach Gl. 2.60 dargestellt. In Abb. 3.7 a sind drei Verläufe zu sehen. Bei zwei Versuchen zeigen die Reibungskoeffizienten eine leichte Abnahme bei zunehmender Zeit. Hingegen zeigt ein Versuch eine Zunahme des Reibungskoeffizienten. Ein ähnlicher Verlauf ist in Abb. 3.7 b zu erkennen. Jedoch sind niedrigere Reibwerte, als die in Abb. 3.7 a zu beobachten. Versuch 2 der radialen Bürste zeigt Schwankungen im Verlauf der Reibungskoeffizient auf. Dieser Verlauf könnte aufgrund von Kontamination des Tribokontakts zu Stande gekommen sein. Die tangentialen Bürsten zeigen in Abb. 3.7 c einen konstanten Verlauf. Ein Versuch bildet eine Ausnahme in dessen Verlauf in den ersten 40 Stunden Schwankungen zu sehen sind. Des Weiteren sind bei allen drei Versuchen der tangentialen Bürsten unterschiedliche Reibungswerte zu erkennen.

Die Auswertung der Verschleißraten nach Gl. 2.60 erfolgte nach einer Laufzeit von 120 Stunden. Aus der Abb. 3.7 d, ist zu erkennen, dass die tangentiale Bürste die höchste Verschleißrate von $0,5 \pm 0,03 \mu\text{m/h}$ aufweist. Die axiale und die radiale Bürste zeigen vergleichbare Verschleißraten, welche im Bereich $0,35 \pm 0,03 \mu\text{m/h}$ und $0,36 \pm 0,05 \mu\text{m/h}$ liegen.

3.5 Stromlose Versuche ohne Kommutierungsstrom

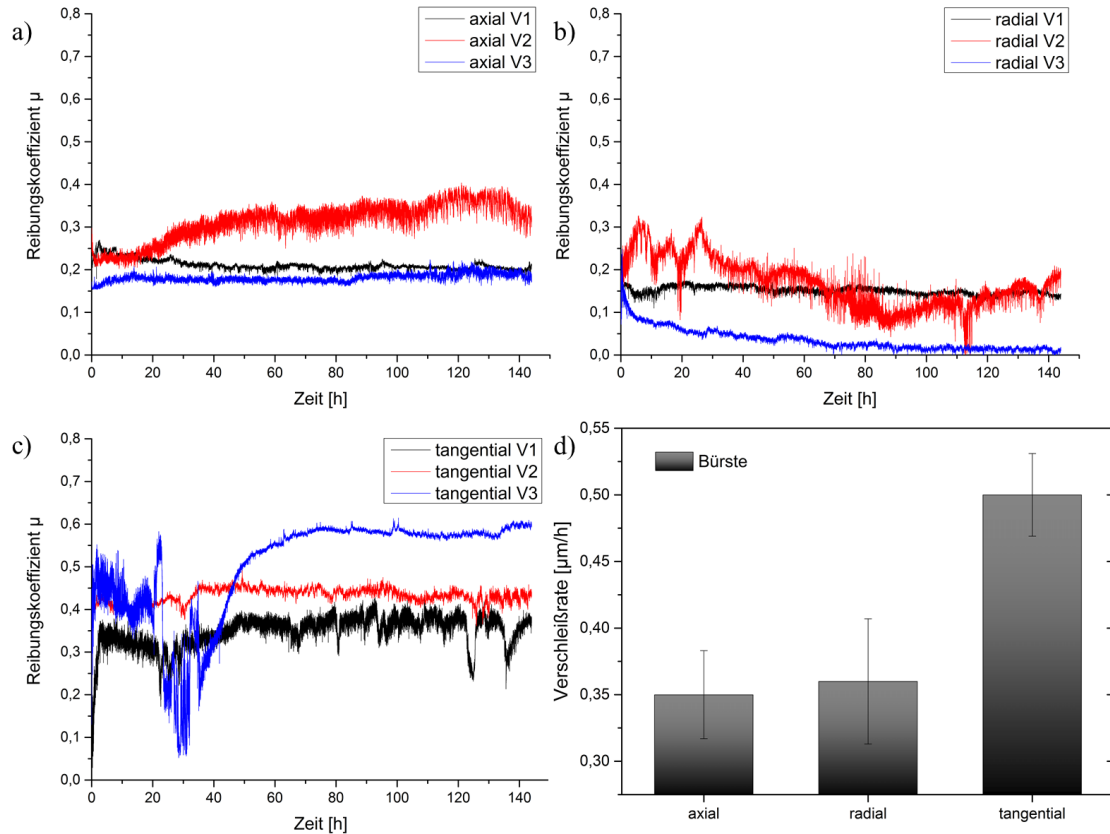


Abbildung 3.7: Reibungs- und Verschleißmessung am KBP mit entfernten Spulen. Verlauf der Reibungskoeffizienten von drei Versuchen jeweils mit a) axialen Bürsten b) radialen Bürsten und c) tangentialen Bürsten. d) Verschleißrate der Kohlebürste nach 140 Stunden Dauerlauf mit $I = 0 \text{ A}$.

Tabelle 3.5 zeigt die ermittelten Bürstentemperaturen ΔT bei $I = 0 \text{ A}$. Die Differenztemperatur ΔT berechnet sich durch die gemessene Temperatur T_{gem} abzüglich der Umgebungstemperatur T_{Umgebung} . Die Temperaturmessstelle lag etwa 2 mm von der Kontaktfläche entfernt.

Es zeigt sich, dass die ermittelte Temperatur der radialen Bürste den niedrigsten Wert aufweist. Der Mittelwert liegt bei $33,3^\circ\text{C}$ und ist um $4,4^\circ\text{C}$ und $6,2^\circ\text{C}$ niedriger, als die Temperaturen der axialen und der tangentialen Bürste.

Pressrichtung der Bürste	axial	radial	tangential
Temperatur ΔT	$37,7 \pm 0,7$	$33,3 \pm 0,7$	$39,5 \pm 1,6$

Tabelle 3.5: Temperaturen der Bürsten nach einem 140 Stundenversuch bei $I = 0 \text{ A}$.

3.5.2 Topographie

In Abb. 3.8 ist ein Teil der Kontaktfläche einer axial gepressten Bürste nach dem Reibungsversuch mittels REM dargestellt. Es lässt sich eine parallele Orientierung der Graphitlamellen zur Oberfläche erkennen. Unter der Oberfläche (im unteren Bildbereich) ist die Soll-Ausrichtung des Graphits sichtbar. Dort orientieren sich die Graphitlamellen senkrecht zur Kontaktfläche.

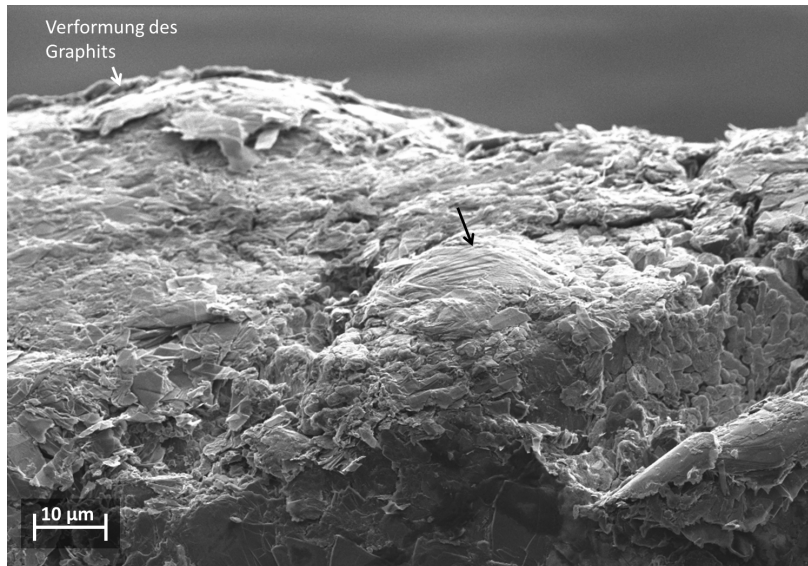


Abbildung 3.8: REM-Aufnahme einer axial gepressten Bürstenoberfläche nach dem Versuchsende.

3.6 Versuche mit Strom ohne Kommutierungssystem

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt der mechanische Verschleiß des unbestromten Tribosystems vorgestellt wurde, wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Materialorientierung der Bürsten auf das Verhalten des Systems in Abhängigkeit des elektrischen Stroms analysiert. Die Versuchsparameter der Tribometermessungen sind Tabelle 3.2 zu entnehmen. Für jede Pressrichtung wurden sechs einzelne Versuchsreihen durchgeführt. Der Mittelwert wurde für einen Intervall von 20 Stunden berechnet.

3.6.1 Verschleiß- und Temperaturmessung

Die Mittelwerte der gemessenen Verschleißraten der Bürsten, der Kontaktwiderstände, sowie der Bürstentemperaturen sind in Abb. 3.9 in Abhängigkeit von der Pressrichtung dargestellt. Die Messwerte sind von 20 Stunden gemittelt.

Der Kontaktwiderstand, der sich aus dem Verhältnis der Summe des Spannungsabfalls über die positive und die negative Bürste zum gemessenen Strom errechnet, ist in Abb. 3.9 a dargestellt. Bei allen Versuchen zeigt der Widerstand mit zunehmender Zeit eine Zunahme. Dabei ist der Widerstand bei den radialen Versuchen am höchsten und beträgt nach 140 Stunden $176 \pm 5 \text{ m}\Omega$ und liegt somit $17 \text{ m}\Omega$ höher, als bei den axialen und tangentialen Versuchen.

Abb. 3.9 b zeigt die gemittelten Temperaturen der Plusbürsten über die gesamte Laufzeit. Die Messungen erfolgten nach dem im Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Verfahren. Alle Bürstentemperaturen steigen mit zunehmender Zeit an. Die Temperatur der tangentialen Bürste erreicht ihr Maximum nach 80 Stunden und beträgt $82 \pm 9,1^\circ\text{C}$. Danach fällt die Temperatur leicht ab und beträgt nach 140 Stunden nur noch $80,5 \pm 4,5^\circ\text{C}$. Die radiale Bürste erreicht ihre maximale Temperatur von $84,7 \pm 5,9^\circ\text{C}$ nach 100 Stunden und weist eine leichte Abnahme auf einen Wert von $83 \pm 3,2^\circ\text{C}$ bei 140 Stunden auf. Die niedrigste Temperatur zeigt die axiale Bürste. Nach 140 Stunden beträgt die gemessene Temperatur nur noch $75,7 \pm 5,6^\circ\text{C}$ und liegt somit um 7°C bzw. 5°C niedriger, als die Temperaturen der axialen und der radialen Bürste.

In Abb. 3.9 c ist für alle Varianten eine exponentielle Abnahme der Verschleißraten mit zunehmender Zeit zu erkennen. Dabei sind geringe Unterschiede bezüglich der Verschleißraten der Bürsten festzustellen. Die radiale Bürste zeigt die niedrigste Verschleißrate über die gesamte Versuchsdauer. Nach einer Laufzeit von 100 Stunden erreichen die Verschleißraten aller Bürsten ein konstantes Niveau unterhalb von $1\text{ }\mu\text{m/h}$. Nach 140 Stunden weist die radiale Bürste eine Verschleißrate von $0,4 \pm 0,35\text{ }\mu\text{m/h}$ auf und liegt somit um $0,25\text{ }\mu\text{m/h}$ niedriger, als die Verschleißraten der axialen und tangentialen Bürste.

3.6.2 Chemische Zusammensetzung der Lamellen

Die chemische Analyse mit XPS-Tiefenprofilen kann in Bezug auf die gebildete Fremdschicht (Patina) auf dem Kommutator eine entscheidende Aussage über das Verhalten des Tribosystems liefern. Des Weiteren kann mithilfe der Analyse die Dicke der Patina abgeschätzt werden. Aus diesem Grund wurden die Proben vor der Analyse nicht gereinigt. Es wurde für alle Proben eine Messfläche von $0,3 \times 0,5\text{ mm}$ verwendet.

In Abb. 3.10 sind XPS-Tiefenprofile für eine Kommutatoroberflächen jeweils der axialen, radialen und tangentialen Versuche nach 140 Stunden dargestellt. In den Reibspuren der analysierten Lamellen wurden Kohlenstoff, Kupfer, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel detektiert. Unmittelbar auf der Oberfläche nimmt der Kohlenstoffgehalt bei allen Lamellen Werte um 95 At.-% an. Innerhalb der ersten 100 nm fällt der Kohlenstoffgehalt stark ab. Alle Sauerstoffsignale nehmen nach dem Maximalwert mit zunehmender Tiefe ab. Die Schwefel- und Stickstoffkonzentrationen schwanken zwischen 0 und 2 At.-%.

Aus den XPS-Tiefenprofilen wird die Patinadicke bestimmt. Sobald der Kupfergehalt einen Wert von 95 At.-% erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass keine Patina mehr vorliegt und das Vollmaterial erreicht ist. Die dickste Patina befindet sich auf dem Kommutator des radialen Versuchs. Die Werte der Patinadicke sind für alle Versuche in der Tabelle 3.6 dargestellt.

Pressrichtung der Bürste	Patinadicke
axial	$1\text{ }\mu\text{m}$
radial	$1,22\text{ }\mu\text{m}$
tangential	$1,04\text{ }\mu\text{m}$

Tabelle 3.6: Patinadicke bei einem Kupfergehalt von 95 At.-%.

3 Pressrichtung der Bürsten

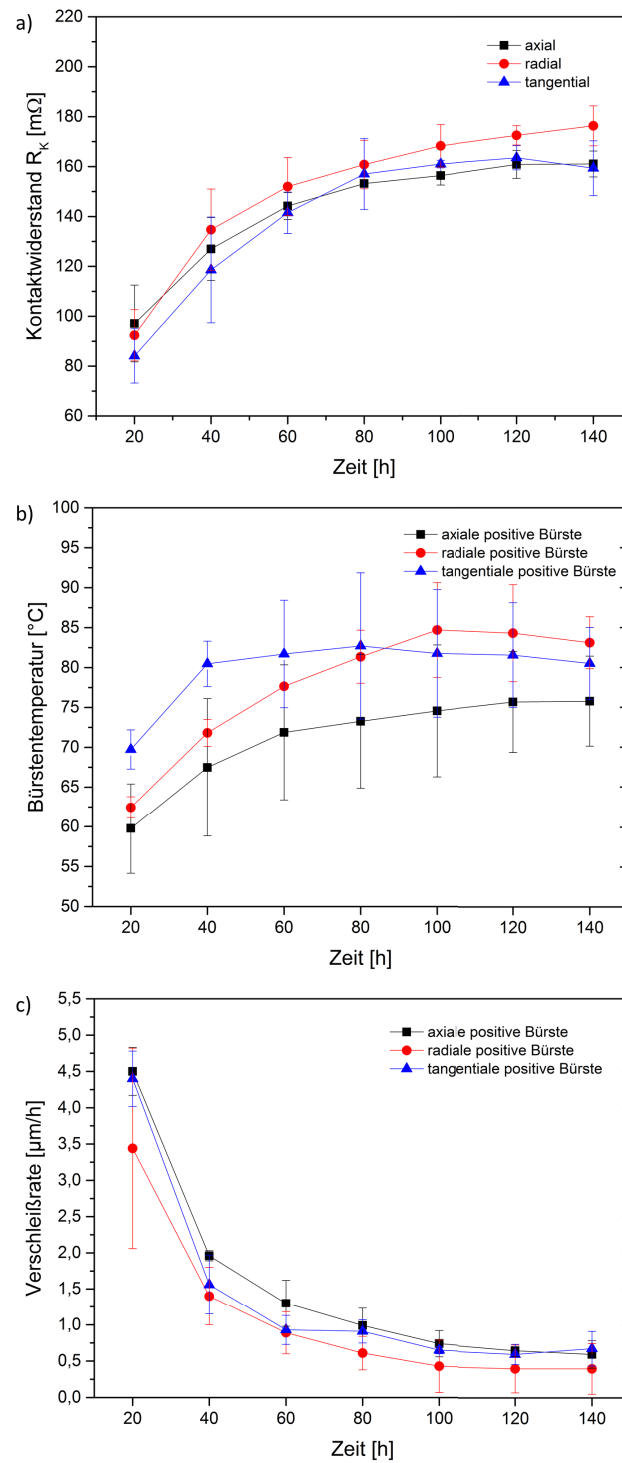


Abbildung 3.9: a) Kontaktwiderstand, b) gemittelte Temperaturen und c) Verschleißraten der positiven Bürsten, jeweils in axialer, radialer und tangentialer Pressung am KBP mit entfernten Ankerspulen, gemessen bei 2000 min^{-1} und $I = 4 \text{ A}$.

3.6 Versuche mit Strom ohne Kommutierungssystem

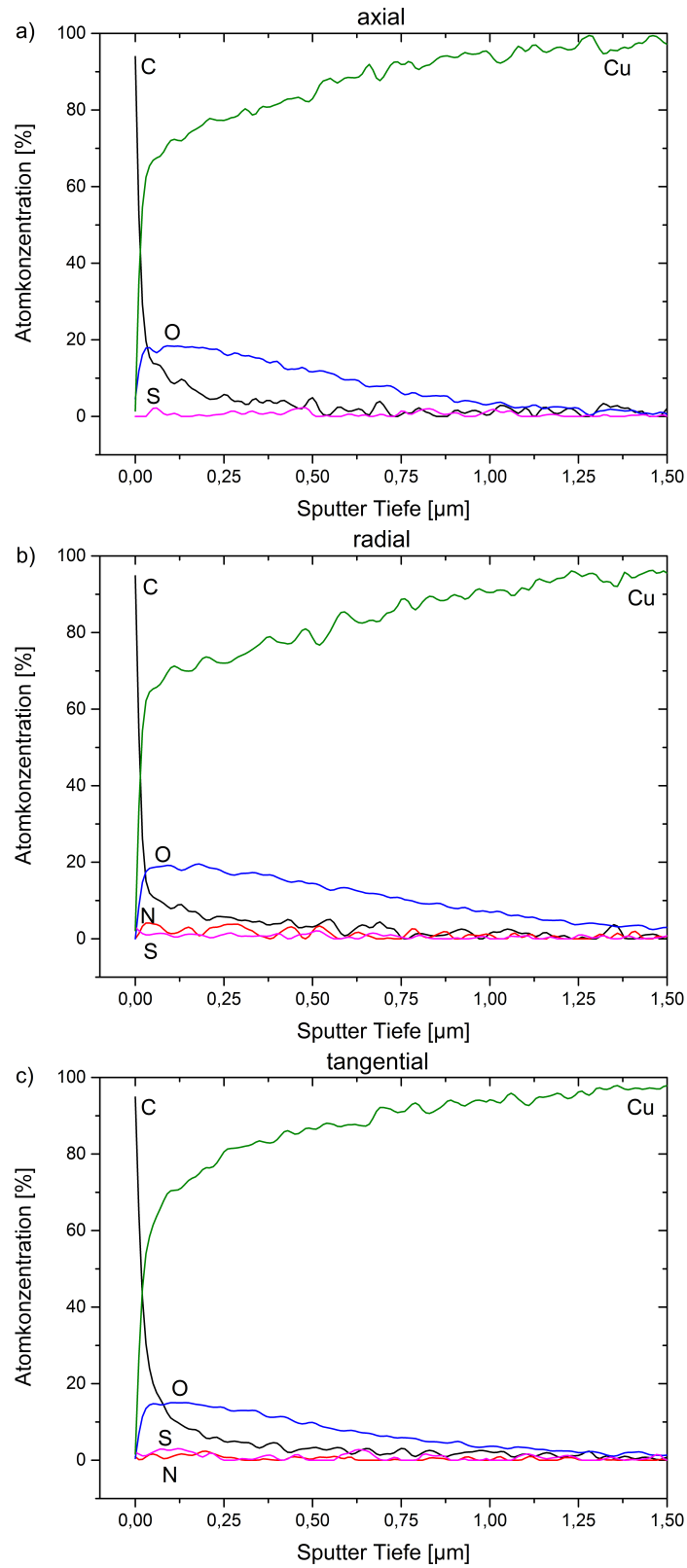


Abbildung 3.10: XPS-Tiefenprofile der Kommutatoroberflächen beim Versuch mit a) axialen, b) radialen und c) tangentialen Bürsten.

3.7 Triboversuche mit Kommutierungssystem am Dauerlaufprüfstand

Um die tribologischen und elektrischen Eigenschaften der Bürsten mit verschiedenen Pressungen im normalen Betrieb zu untersuchen, wurden die Bürsten in reale Motoren eingebaut und diese für eine Gesamtversuchsdauer von 720 Stunden geprüft. Es wurden am Dauerlaufprüfstand (DLP) drei Versuche mit axialer, radialer und tangentialer Pressrichtung durchgeführt. Jede Versuchsreihe enthielt drei Motoren mit unterschiedlich gepressten Bürsten. Dazu wurde ein Betriebszyklus erstellt, bei dem die Motoren für 10 Sekunden drehen und anschließend für 60 Sekunden stoppen. Die reine Laufzeit der Motoren am DLP betrug 102 Stunden. Die Laufzeit wurde so ausgewählt, dass das System eine konstante Temperatur beibehält. Die Versuchsparameter können in Tabelle 3.3 eingesehen werden. In Tabelle 3.7 sind die Mittelwerte des Stroms sowie die Drehzahl in der jeweiligen Pressrichtung dargestellt. Die Ergebnisse der drei Dauerlaufversuche wurden gemittelt. Den höchsten Stromwert bei den Versuchen zeigte die axiale Bürste und den niedrigsten die tangentiale Bürste. Es sind keine belastbaren Unterschiede der gemittelten Drehzahl zwischen den Versuchen zu erkennen.

	axial	radial	tangential
Strom [A]	$6,3 \pm 0,7$	$6,0 \pm 1,3$	$5,7 \pm 1,25$
Drehzahl [min^{-1}]	2500 ± 85	2502 ± 88	2472 ± 134
Spannung [V]	12	12	12

Tabelle 3.7: Gemittelte Messwerte der Versuche aus dem DLP mit Kommutierung.

3.7.1 Verschleiß

Der absolute Verschleiß der positiven Kohlebürsten sowie der Kommutatoren in Abhängigkeit der Pressrichtung sind in Abb. 3.11 dargestellt. Der aus drei Versuchen gemittelte Verschleißwert zeigt keinen markanten Unterschied zwischen den Kohlebürsten. Auffällig bei den Versuchsreihen ist jedoch die große Standardabweichung der Messwerte. Mit 1 mm weist die radiale Bürste den höchsten Verschleißwert der Messreihen auf.

In Abb. 3.11 rechts ist der absolute Verschleiß der Kommutatoren dargestellt. Analog zur Messung des Bürstenverschleißes wurden die Kommutatoren nach dem Versuchsende mit dem Konfokalmikroskop analysiert. Die Messungen erfolgten in der Mitte der Lamellen. Es zeigte sich, dass der Kommutator der tangentialen Versuche am stärksten abgenutzt wurde. Sein Verschleißwert liegt bei $58 \mu\text{m}$. Die gemittelten Verschleißwerte der axialen und radialen Kommutatoren liegen mit den Werten von $45 \mu\text{m}$ niedriger und sind nicht belastbar zu unterscheiden.

3.7 Triboversuche mit Kommutierungssystem am Dauerlaufprüfstand

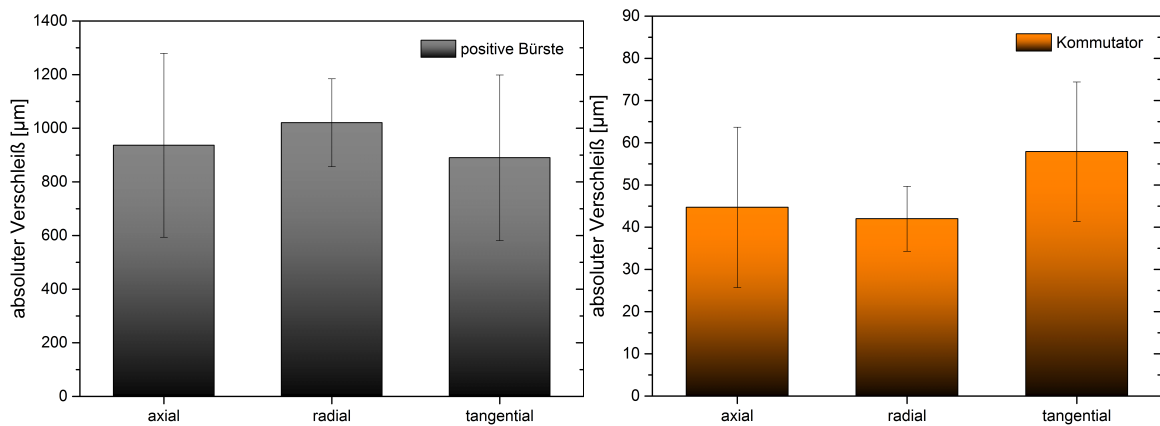


Abbildung 3.11: Absoluter Verschleiß der positiven Kohlebürsten mit jeweiliger Pressrichtung (links) und den dazugehörigen Kommutatoren (rechts).

3.7.2 Analyse der Proben aus dem Dauerlaufprüfstand

3.7.2.1 REM und EDX-Analyse der Kontaktflächen

Die Kommutatoren und Bürstenauflflächen wurden zur genaueren Analyse mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. In Abb. 3.12 und Abb. 3.14 sind die REM-Aufnahmen der Bürstenoberflächen bzw. der Kommutatoroberflächen dargestellt. Auf den Oberflächen der Bürsten sind neben Graphitstrukturen Verschleißpartikel verschiedenster Größen und Formen zu erkennen. Die 1000-fache Vergrößerung eines ausgewählten Bereichs jeder Bürstenoberfläche macht die Ausrichtung der Graphitlamellen an der Kontaktfläche sichtbar. Für eine genauere Beurteilung der Ausrichtung wurden Aufnahmen mit einer 5000-fachen Vergrößerung erstellt. Alle Bürsten verschiedener Pressungen zeigten nach dem Dauerlaufversuch eine Orientierung ihrer Graphitlamellen parallel zur Gleitoberfläche.

Die radiale Bürste zeigt zusätzlich zu runden Verschleißpartikeln aufgerollte Varianten, welche eine Länge von etwa $60\mu\text{m}$ aufweisen. Diese Erscheinung ist in Abb. 3.13 zu erkennen. Als interessant erweist sich, dass diese Erscheinungsform nicht auf der axialen oder auf der tangentialen Bürstenoberfläche zu erkennen ist. Ihre chemische Zusammensetzung wurde mit EDX (Abb. 3.13) untersucht. Die Bestandteile des aufgerollten Materials bestehen zum Großteil aus Kupfer und seinen Oxiden. Spurenweise konnten Elemente wie Silizium, Aluminium und Eisen detektiert werden, welche durch Verschmutzung des Versuchsprüfstands oder durch das Probenträgermaterial verursacht sein könnten.

Die EDX-Analyse (Abb. 3.13) der gerollten Verschleißteile ergab, dass sich diese ebenfalls aus Kupfer und Kupferoxiden zusammensetzen.

3 Pressrichtung der Bürsten

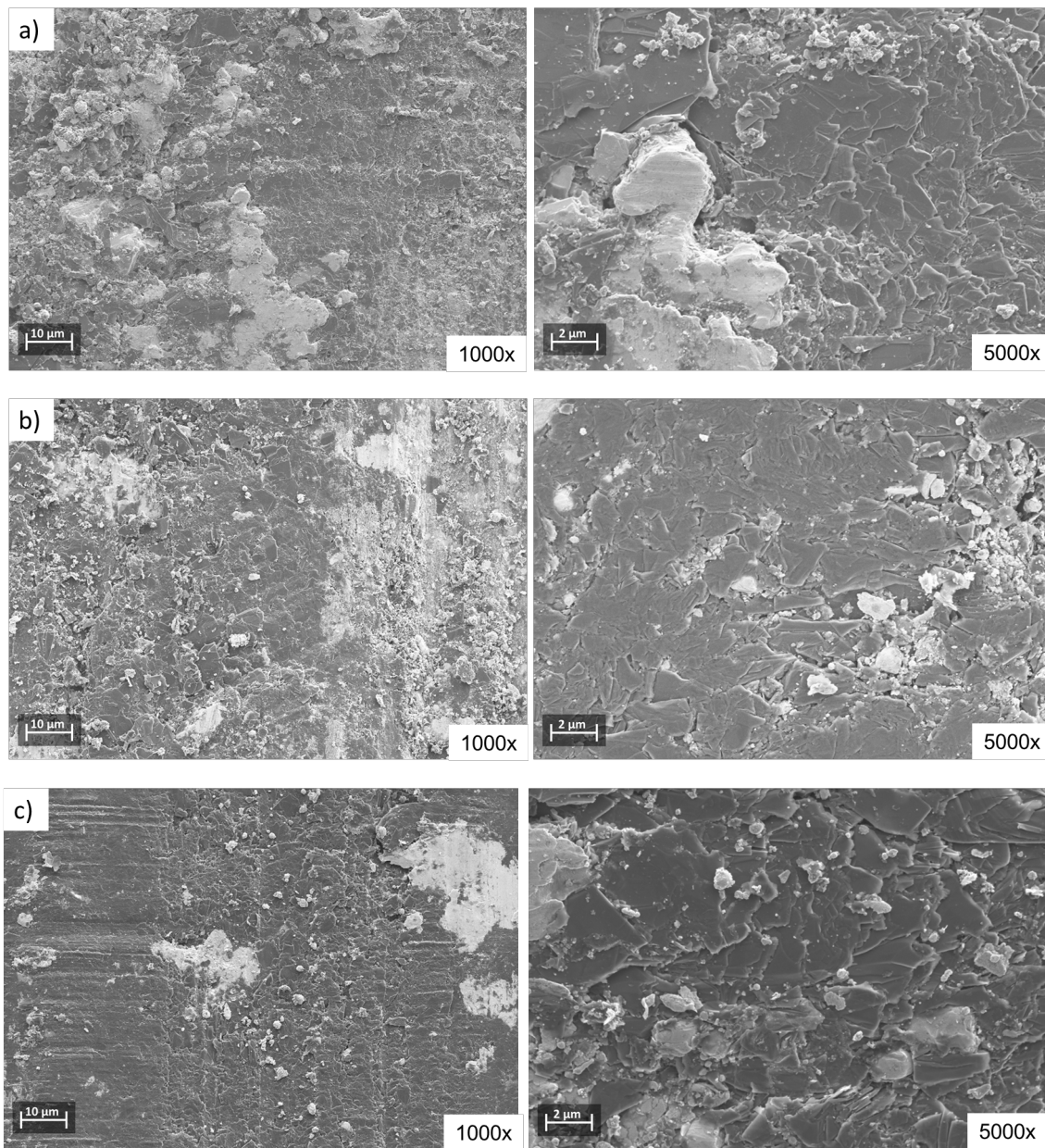


Abbildung 3.12: REM-Aufnahmen der Bürstenoberflächen jeweils mit a) axialer, b) radialer und c) tangentialer Pressrichtung nach dem Versuch am Dauerlaufprüfstand.

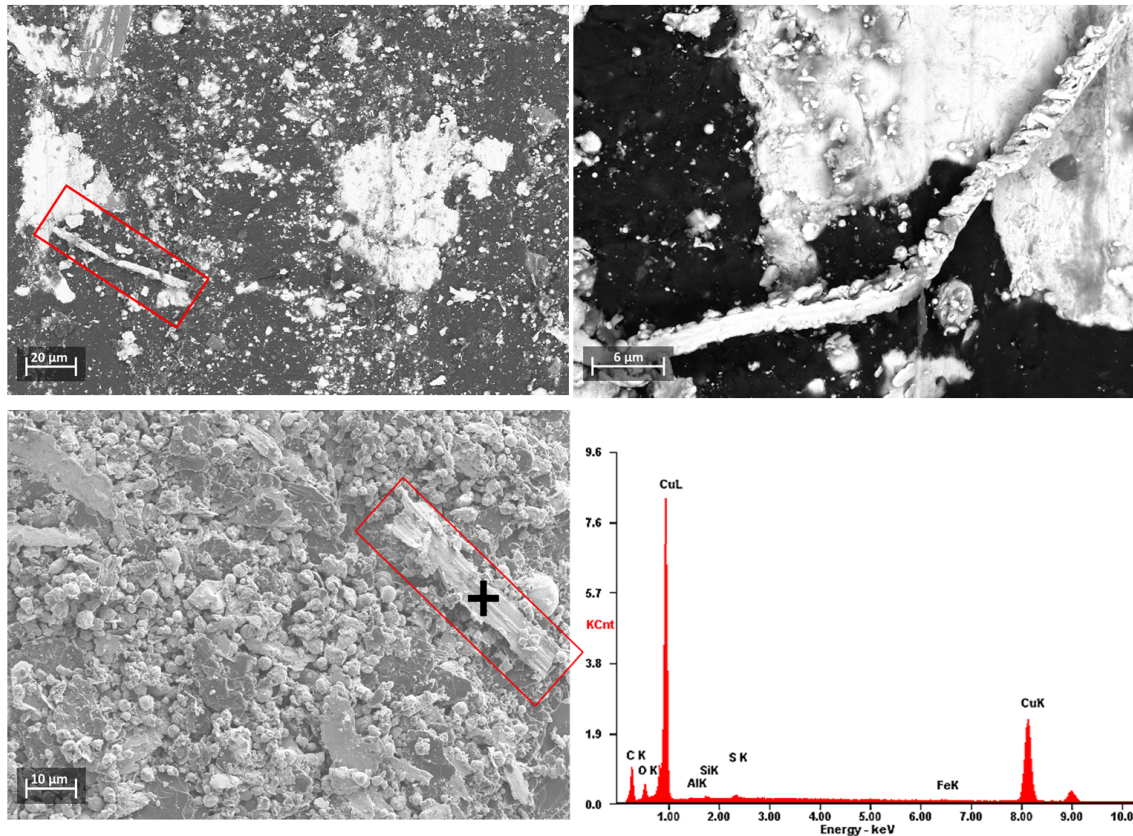


Abbildung 3.13: REM-Aufnahmen vom aufgerollten Verschleißmaterial auf der Oberfläche der radial gepressten Bürste, sowie die chemische Analyse dazu (EDX links unten).

Abb. 3.14 zeigt die REM-Aufnahmen einer kompletten Lamelle von 7 Lamellen nach Belastung mit axial, radial und tangential gepressten Bürsten. Auf allen Abbildungen sind helle, sowie dunkle Bereiche zu erkennen. Diese Erscheinungen treten bei allen untersuchten Kommutatorlamellen auf. Die hellen Zonen sind vermehrt an der ablaufenden¹ Lamellenkante erkennbar. Bei weiterer Vergrößerung dieser Bereiche lässt sich auf allen Lamellen geschmolzenes Material, sowie eine raue Unterstruktur erkennen. Die dunklen Zonen weisen hingegen typische Kommutator-Verschleißspuren auf [11][S. 161]. In Abb. 3.15 a sind EDX-Analysen von hellen, sowie dunklen Zone dargestellt. Es zeigt sich, dass die helle Zone der Lamelle hauptsächlich aus Kupfer besteht. Der Kohlenstoffgehalt liegt in diesem Bereich unterhalb des Sauerstoffgehalts. Im Gegensatz dazu überwiegt der Kohlenstoffgehalt in der dunkleren Zone über den Sauerstoffgehalt (Abb. 3.15 b).

¹Die ablaufende Lamellenkante eines Kommutators ist die Kante, die die Kohlebürste zuletzt verlässt.

3 Pressrichtung der Bürsten

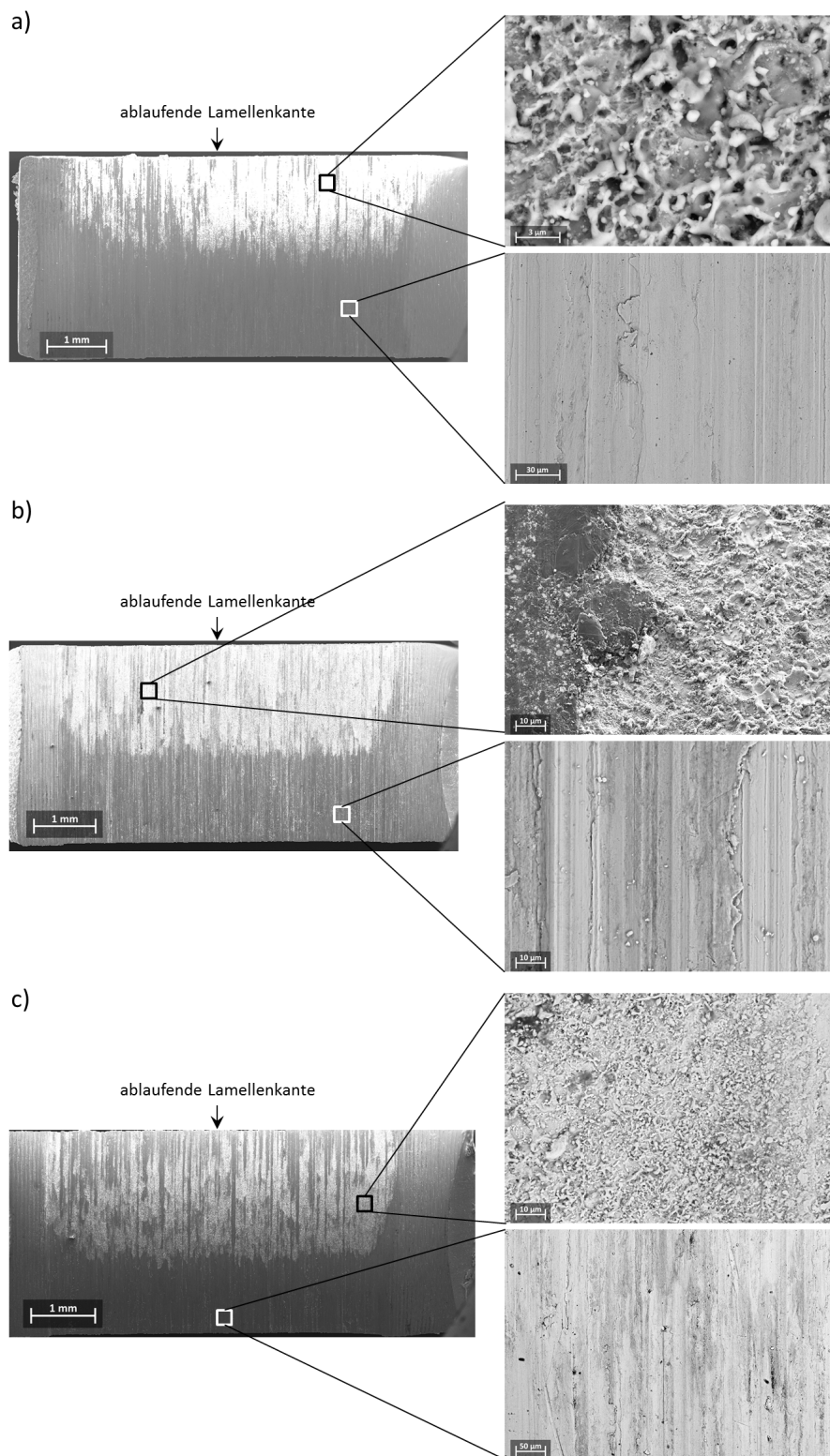
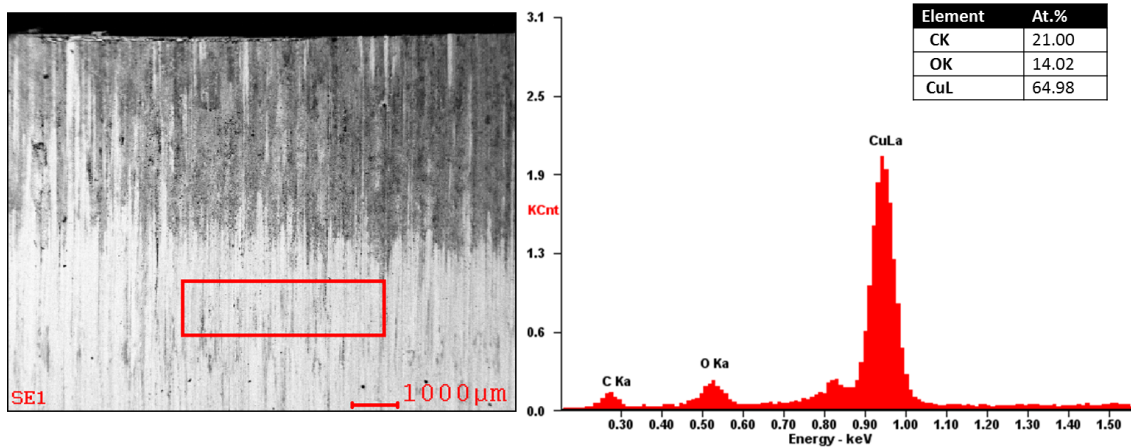


Abbildung 3.14: REM-Aufnahmen einer Lamelle aus einem Versuch mit einer axialen (a), radialen (b) und tangentialen (c) Pressrichtung.

3.7 Triboversuche mit Kommutierungssystem am Dauerlaufprüfstand

a)



b)

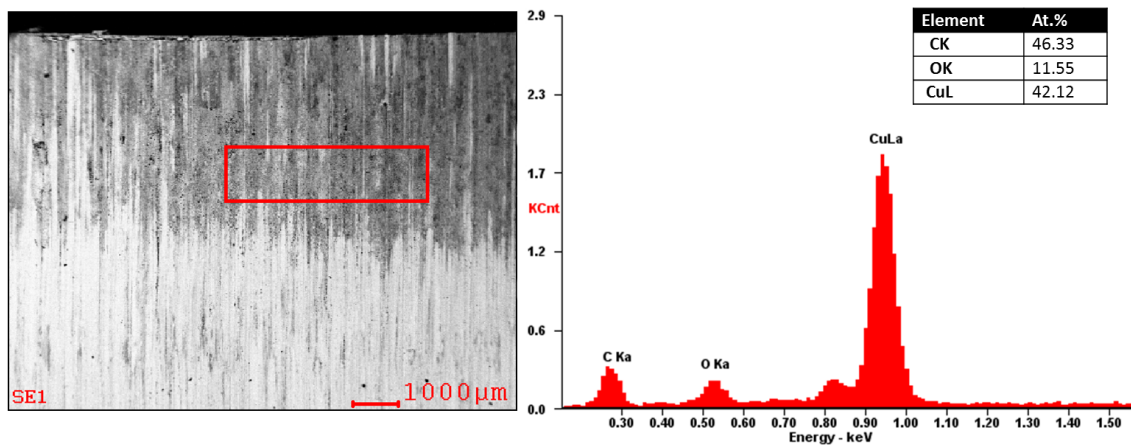


Abbildung 3.15: EDX-Aufnahmen der dunklen Zone (a), sowie der hellen Zone (b) einer Kommutatorlamelle.

Die hellen und die dunklen Zonen weisen unterschiedliche Verschleißwerte auf. Der höchste Verschleiß trat bei allen untersuchten Proben an der ablaufenden Kante im hellen Bereich auf. Tabelle 3.8 zeigt die Verschleißdifferenz ΔW zwischen der auflaufenden ² und der ablaufenden Lamellenkante verschiedener Kommutatoren.

$$\Delta W = W_{ab} - W_{auf} \quad (3.2)$$

Hier sind W_{auf} und W_{ab} der absolute Verschleiß der auflaufenden bzw. der ablaufenden Lamellenkante eines Kommutators. Die Ergebnisse zeigen einen Mittelwert von 8 Lamellen pro Kommutator. Aus der Tabelle 3.8 lässt sich entnehmen, dass die größte Verschleißdifferenz bei dem axialen und der kleinste Unterschied bei dem radialen Kommutator aufgetreten ist.

²Die auflaufende Lamellenkante eines Kommutators ist die Kante, die die Bürste zuerst kontaktiert.

3 Pressrichtung der Bürsten

Versuch	Verschleißdifferenz ΔW
axial	$10,1 \pm 1,7 \text{ }\mu\text{m}$
radial	$3,2 \pm 0,3 \text{ }\mu\text{m}$
tangential	$7,9 \pm 2,4 \text{ }\mu\text{m}$

Tabelle 3.8: Verschleißdifferenz zwischen der ablaufenden und der auflaufenden Lamellenkante des Kommutators nach dem Dauerlaufversuch.

3.7.2.2 Gefügeanalyse der ab- und auflaufenden Kommutatorlamellen

Um die Entwicklung der Randzone nach der elektrischen und mechanischen Beanspruchung zu untersuchen, wurden FIB-Schnitte in den hellen (ablaufende Lamellenkante), sowie dunklen Zonen (auflaufende Lamellenkante) freigelegt. Die einzelnen Lamellen wurden aus den Kommutatoren entfernt und mit Isopropanol im Ultraschallbad für 5 Minuten gereinigt. Aus diesem Grund kann durch die FIB-Schnitte keine Aussage mehr über die Dicke der Patina getroffen werden.

Die REM-Aufnahmen haben gezeigt (Abb. 3.14), dass die dunklen Zonen mit Verschleißspuren behaftet sind. Die hellen Zonen sind dagegen rau und weisen eine strukturlose Oberfläche auf. Anhand der FIB-Analyse konnte eine Kornverfeinerung in den dunklen Zonen im oberflächennahen Bereich bei allen Versuchsproben festgestellt werden.

Abb. 3.16 a links zeigt die Kornverfeinerung unter der Randschichtzone einer Lamelle aus einem axialen Versuch. Die Korngröße ist bis zu einer Tiefe von ca. $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ stark verfeinert und steigt mit zunehmender Tiefe ab. Des Weiteren sind Defekte, sowie eingearbeitetes Fremdmaterial in der oberen Randschicht zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeigt die helle Zone in Abb. 3.16 a rechts keine deutliche Kornverfeinerung in ihrem Gefüge.

In Abb. 3.16 b sind die FIB-Schnitte des (radial) Kommutators dargestellt. Im linken Bild ist analog zur axialen Lamelle eine Kornverfeinerung zu erkennen. Die Kornverfeinerung ist bis zu einer Tiefe von $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ stark ausgeprägt. Die gesamte abgeschätzte Tiefe der Kornverfeinerung liegt bei etwa $5,2 \text{ }\mu\text{m}$. Zusätzlich ist eine parabelförmige Materialeinarbeitung bis zu einer Tiefe von $2 \text{ }\mu\text{m}$ zu beobachten. Die rechte Spalte in Abb. 3.16 präsentiert den Schnitt in die hellen Zonen der Lamellen. In der Mitte des Bildes, unmittelbar unter der Oberfläche, ist eine leichte Kornverfeinerung bis zu einer Tiefe von $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ erkennbar. Die verbleibenden Gefüge zeigen keine markante Änderung in ihrer Struktur.

Analog zu den vorherigen FIB-Schnitten der axialen und radialen Lamellen zeigt die tangential Lamelle eine tiefe Kornverfeinerung in der dunklen Zone, jedoch keine Gefügeänderung in der hellen Zone. Die gesamte Tiefe der Kornverfeinerung beträgt $5 \text{ }\mu\text{m}$.

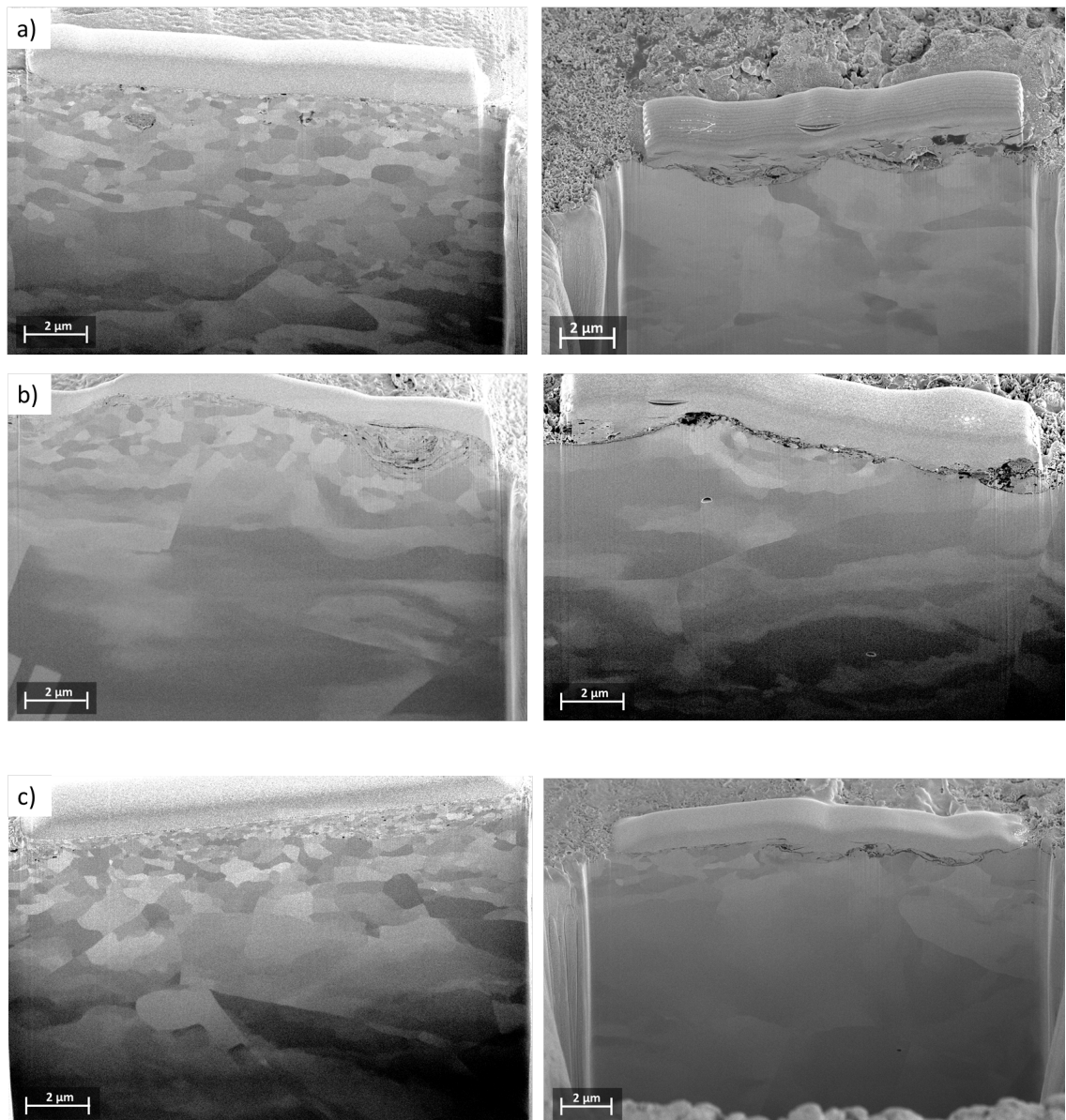


Abbildung 3.16: FIB-Schnitte in der dunklen Zone (jeweils links), sowie in der hellen Zone (jeweils rechts) in Versuchen mit a) axialen, b) radialen und c) tangentialen Bürsten. Die Schnitte sind in der Kommutatoroberfläche senkrecht zur Laufrichtung freigelegt.

3.7.2.3 Patinadicke

Die auf dem Kommutator gebildete Patina lässt sich durch ihre chemische Zusammensetzung sowie durch ihre Dicke charakterisieren. Hierbei wurde eine XPS-Messfläche von $300 \times 300 \mu\text{m}$ analysiert. Um eine Aussage über die Patinadicke treffen zu können, wurden die Lamellen vor der XPS-Messung nicht gereinigt. Eine Übersicht aller XPS-Tiefenprofile ist im Anhang A in Abb. 6.4 dargestellt. Die Spektren zeigen die Atomkonzentration der Bestandteile Kupfer (Cu), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Molybdän (Mo) und Schwefel (S) der Fremdschicht bzw. der Patina über eine Abtragstiefe von $1,9 \mu\text{m}$. Die Spektren zeigen Unterschiede in der

3 Pressrichtung der Bürsten

Atomkonzentration der ablaufenden (heller Bereich) und der auflaufenden (dunkler Bereich) Lamellenkante. Der Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt fällt in der auflaufenden Lamellenkante unmittelbar unter der Oberfläche steil ab, während der Kupfergehalt in diesem Bereich im gleichen Maß ansteigt. Die ablaufende Kante zeigt hingegen einen exponentiellen Abfall des Kohlenstoffgehalts, während der Kupfergehalt einen entsprechenden Anstieg aufweist. Der Molybdän- und Schwefelgehalt liegen unterhalb von 1 At.-%.

Um eine Aussage über die Fremdschichtdicke bzw. die Patinadicke treffen zu können, wurde die Tiefe aus dem XPS-Tiefenprofil bei einem Kupfergehalt von 95 At.-% abgelesen. Abb. 3.17 zeigt die ermittelte Fremdschichtdicke der ablaufenden sowie der auflaufenden Lamellenkanten der Kommutatoren. Die ausgebildete Fremdschicht auf den Lamellenoberflächen des Versuches mit axialen und radialen Bürsten unterscheidet sich in ihrer Dicke in beiden Bereichen. Der Bereich der ablaufenden Lamellenkante weist dabei eine dickere Fremdschicht auf. Bei dem Versuch mit tangentialen Bürsten ist kein belastbarer Unterschied zum Versuch mit axialen Bürste bezüglich der Fremdschicht zu erkennen. Die dickste Fremdschicht ist im Bereich der ablaufenden Lamellenkante des Kommutators mit radialer Bürste zu erkennen. Jedoch wurde die dünnste Schicht im Bereich der auflaufenden Kante des tangentialen Kommutators gebildet.

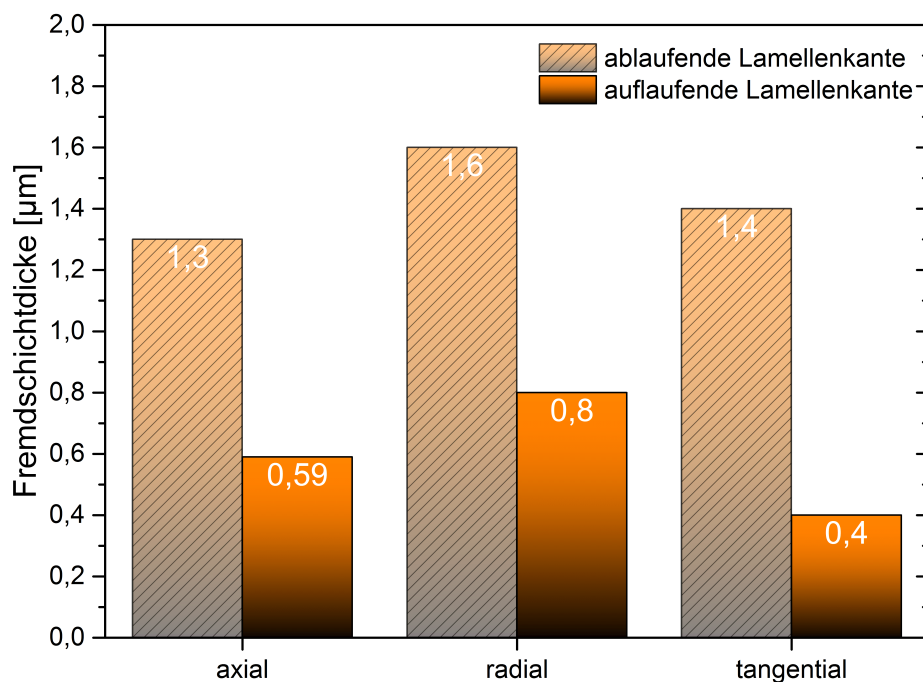


Abbildung 3.17: Fremdschichtdicke der ablaufenden und auflaufenden Lamellenkanten, ermittelt aus den XPS-Tiefenprofilen bei einem Kupfergehalt von 95 At.-%.

3.8 Festigkeitssteigerung durch Partikelbestrahlung

Die Verformung im Vielkristall entsteht durch die Bewegung von Versetzungen der Gleitebenen. Unter Versetzungen versteht man eine Veränderung des Kristallgitters eines Metalls. Versetzungen entwickeln sich ursprünglich während der Herstellung eines Metalls beim Wachsen der Kristalle aus dem flüssigen Zustand. Durch eine Beanspruchung können die Versetzungen durch das Brechen der Atombindungen eingeschoben werden [14][S. 43]. Bei der Wiederholung dieses Prozesses stauen sich die Versetzungen an den Korngrenzen auf. Infolgedessen treten hohe Spannungen auf, die die Trennfestigkeit des Werkstoffs überschreiten und somit zum Brechen des Korns führen.

Die Festigkeitssteigerung eines Metalls kann nach der Hall-Petch-Beziehung durch Kornverfeinerung des Kristalls erfolgen [25][S. 127]. Diese besagt, dass je kleiner die Korngröße ist, desto größer wird der Widerstand gegenüber einer Versetzungsbewegung. Der Hall-Petch-Effekt beschreibt (Gl. 3.3) die Beziehung zwischen der Festigkeitssteigerung $\Delta\sigma$ und dem Durchmesser d eines Korns, wobei k die Hall-Petch-Konstante des Werkstoffs ist und für Kupfer $3,5 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$ beträgt [66][S. 220].

$$\Delta\sigma = \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (3.3)$$

Die Kornverfeinerung eines Metalls erfolgt durch plastische Deformation und kann durch Wiederholung des Vorgangs eine zunehmende Festigkeitssteigerung bewirken. In dieser Arbeit wird die Festigkeit des Kupfers durch das Partikelbestrahlen gesteigert. Dabei wird die Kommutatoroberfläche mit Wolframcarbid unter hohem Druck bestrahlt. Wolframcarbid (WC) zählt zu den nichtoxidischen Hartstoffen. In Tabelle 3.9 sind die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Wolframcarbids gegenüber den Eigenschaften von Kupfer dargestellt. Wolframcarbid weist eine hohe Härte, einen hohen Schmelzpunkt und ein hohes Elastizitätsmodul auf. Die guten mechanischen Eigenschaften des Wolframcarbids beruhen auf den starken kovalenten Bindungen zwischen den Atomen. Des Weiteren zählt Wolframcarbid zu den guten elektrischen Leitern. Während der Herstellung wird Wolframcarbidpulver mit dem Bindemetall Kobalt (4% bis 15%) gemischt, gepresst und gesintert. Durch das Aufschmelzen des Kobalts werden die Körner des Wolframcarbids benetzt und die Poren geschlossen [14][S. 278].

	Wolframcarbid (WC)	Kupfer (Cu)
Dichte g/cm^3	15,7	8,93
Härte HV 1	2100	110
Schmelztemperatur $^{\circ}\text{C}$	2800	1083
E-Modul N/mm^2	700000	115000
Spez. elektr. Widerstand $\Omega \cdot \text{m}$	20×10^{-8}	$1,7 \times 10^{-8}$

Tabelle 3.9: Eigenschaften des Strahlmittels Wolframcarbid im Vergleich zu Kupfer [14].

3.8.1 Oberflächenbehandlung des Kommutators durch Partikelbestrahlung

Als Lösungsansatz zur Verschleißminimierung des Kommutators kommt die Oberflächenbehandlung von Kommutatorlamellen durch Partikelbestrahlung in Frage. Diese Oberflächenbehandlung wurde gewählt um eine Kornverfeinerung des Kupfers zu erzielen. Bei der Auswahl des Strahlmittels sind die Eigenschaften des Werkstoffs, wie beispielsweise eine hohe Festigkeit und eine gute elektrische Leitfähigkeit von großer Bedeutung. Des Weiteren spielt die resultierende Oberflächenrauheit für die tribologischen Versuche eine entscheidende Rolle. Der Ausgangszustand der Oberfläche soll dabei nach der Behandlung eine möglichst ebene Oberfläche aufweisen. Es wurden vier verschiedene Strahlmittel (Nussschalen, Wolframcarbid, Aluminiumoxid und Stahl) ausgewählt und die Oberfläche des Kommutators damit behandelt. Eine Übersicht der Parameter ist in Anhang A, Abb. 6.5 gegeben. Zu jeder Probe sind die Versuchsparameter wie Druck, Strahlwinkel, Partikelmenge, Strahlzeit und die gemessene arithmetische Rauheit R_a berücksichtigt worden. Es zeigt sich, dass die Oberflächenrauheit durch die Versuchsparameter und die Strahlmittel beeinflusst wird. Alle bestrahlten Oberflächen mit einem Strahlwinkel zwischen dem Schießgerät und der Probenoberfläche von 90° weisen hohe Rauheiten auf. Das Bestrahlen mit Nussschalen führte zur stochastischen Deformation der Oberflächen. Die Stahlkugeln verursachten im Ausgangszustand eine raue Oberfläche mit einzelnen Spitzen. Da Wolframcarbid bessere mechanische und elektrische Eigenschaften, als Aluminiumoxid hat, wurde die Auswahl Wolframcarbid getroffen. Wolframcarbid ist ein Hartmetall und wird bei der Herstellung mit dem Element Cobalt (Co) gemischt und gesintert [67][S. 511].

Die in der Tabelle 3.8 dargestellten Ergebnisse zeigen einen Verschleißunterschied zwischen den ablaufenden und auflaufenden Kanten der Kommutatorlamelle. Die Kommutatorlamellen wurden durch Lichtbögen an den ablaufenden Lamellenkanten stark abgenutzt. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde die Oberfläche des Kommutators mit Wolframcarbid (WC) als Strahlmittel unter definierten Parametern bestrahlt.

Die topographische Analyse der bestrahlten Proben wurde mit einem Licht- und Konfokalmikroskop untersucht. Um eine qualitative Aussage über die Härte des Kupfers zu treffen, wurde das Kupfergefüge durch einen FIB-Schnitt analysiert. Die Änderung der chemischen Zusammensetzung an der Probenoberfläche, sowie die Änderung ihrer Matrix wurden mittels XPS untersucht. Abschließend wurden die bestrahlten Kommutatoren in die realen Motoren eingebaut und für einen Dauerlauf von 720 Stunden geprüft.

3.8.2 Topographische Analyse

Nach der Bearbeitung der Kommutatoroberfläche wurde die Oberfläche der Proben im Ausgangszustand auf ihre Rauigkeit hin untersucht. Abb. 3.18 a zeigt eine unbehandelte und eine bestrahlte Kommutatoroberfläche. Die unbehandelte Kommutatoroberfläche zeigt ein Oberflächenprofil mit einer Strukturhöhe von $2,75\text{ }\mu\text{m}$ und einem Rauheitswert R_a von $1,04 \pm 0,17\text{ }\mu\text{m}$. Die behandelte Kommutatoroberfläche ist strukturlos und weist eine Rauheit R_a von $0,61 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ auf.

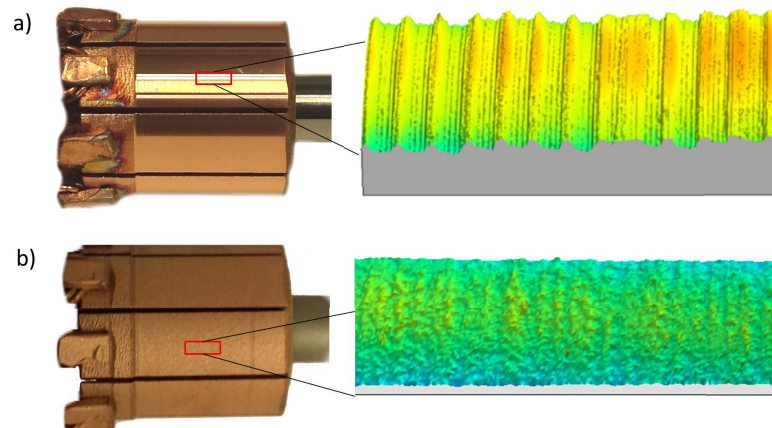


Abbildung 3.18: Mikroskopieaufnahme und 3D-Konfokalbild eines a) unbehandelten sowie eines b) mit Wolframcarbid bestrahlten Kommutators.

3.8.3 Gefügeanalyse und chemische Zusammensetzung

In Abb. 3.19 (links) ist einen FIB-Schnitt einer nicht bestrahlten und (rechts) einer mit Wolframcarbid bestrahlten Kommutatoroberfläche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Gefüge der bestrahlten Oberfläche durch Verkleinerung der Körner, sowie der Einarbeitung von Wolframcarbid verändert hat. Ihre Bestandteile bestehen aus feinen und groben Körnern mit dunklem und hellem Kontrast. Die gemessene Tiefe der veränderten Gefüge liegt bei $11,7\text{ }\mu\text{m}$. Des Weiteren sind Risse mit horizontaler Ausrichtung zu sehen. Im Gegensatz dazu zeigt die nicht bestrahlte Oberfläche (Abb. 3.19 rechts) ein homogenes Gefüge.

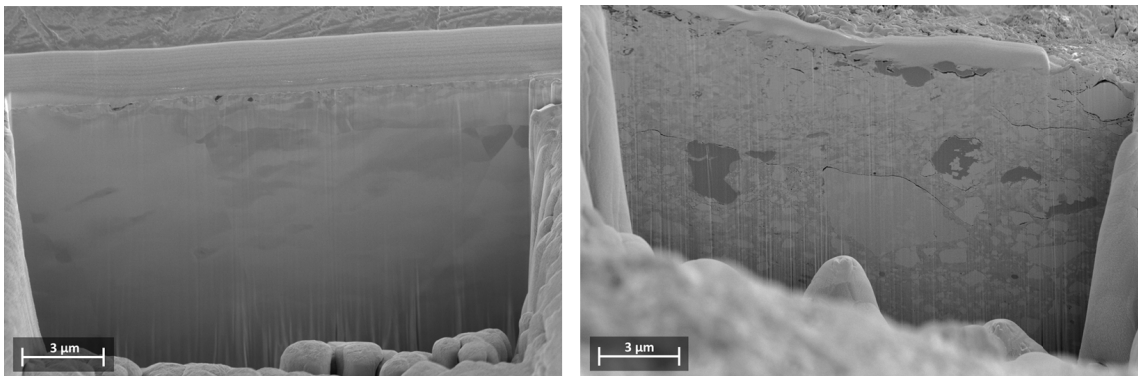


Abbildung 3.19: Gefügestruktur eines unbehandelten (links) und eines mit Wolframcarbid bestrahlten (rechts) Kommutators.

In Abb. 3.20 sind die Tiefenprofile der chemischen Zusammensetzung von bestrahlten (rechts) und nicht bestrahlten (links) Oberflächen dargestellt. Um eine Aussage über Oberflächenverunreinigungen zu treffen, wurden die Proben vor der XPS-Messung nicht gereinigt. Die XPS-Messung wurde gestoppt, sobald der Kupferanteil den Wert 95 At.-% erreicht hat. Das linke Profil zeigt eine gesamte Tiefe von 500 nm und das rechte Profil eine Tiefe von $5\text{ }\mu\text{m}$.

3 Pressrichtung der Bürsten

Unmittelbar auf der Oberfläche der Referenzprobe sind Kupfer, Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff nachweisbar. Der Kohlenstoffgehalt liegt bei 60 At.-% und fällt innerhalb der ersten 10 nm auf 2 At.-% ab. Sein Gehalt nimmt mit steigender Tiefe ab und ist bis 500 nm nachweisbar. Der Sauerstoffgehalt liegt innerhalb der ersten 10 nm bei 6 At.-% und schwankt ab dieser Tiefe zwischen 2 und 0,5 At.-%. Der Stickstoffgehalt bleibt unterhalb 1 At.-%. Auf der bestrahlten Oberfläche sind zusätzlich die Elemente Kobalt und Wolfram zu erkennen. Unter der Oberfläche fällt die Konzentration von Kohlenstoff, Kobalt und Wolfram ab. Die Elemente Wolfram und Kobalt sind innerhalb der gesamten Messtiefe detektierbar.

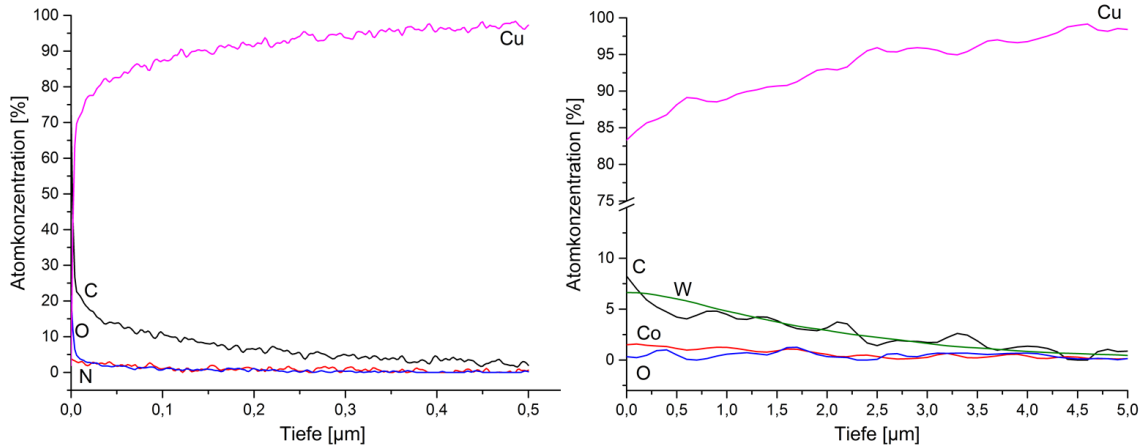


Abbildung 3.20: XPS-Tiefenprofil einer unbehandelten (links) und einer mit Wolframcarbid bestrahlten (rechts) Kommutatoroberfläche.

3.8.4 Dauerlaufversuch

Die mit Wolframcarbid bestrahlten Kommutatoren wurden in einen realen Motor eingebaut und auf den Verschleiß des Kommutators, bzw. der Bürsten für eine Gesamtdauer von 720 Stunden untersucht. Die Versuchsparameter sind aus der Tabelle 3.3 zu entnehmen. Ziel des Versuchs war es, den Verschleiß des Kommutators, insbesondere im Bereich der ablaufenden Lamellenkante, mithilfe der Festigkeitssteigerung von Kupfer zu minimieren.

In Abb. 3.21 ist der Verschleiß der Kohlebürste und des Kommutators dargestellt. Die Verschleißmessungen wurden an der auflaufenden, sowie ablaufenden Lamellenkante des Kommutators durchgeführt. Aus Abb. 3.21 lässt sich nach der Bestrahlung eine Absenkung, sowohl im Bürsten-, als auch im Kommutatorverschleiß erkennen. Des Weiteren nimmt die Verschleißdifferenz zwischen der auflaufenden und ablaufenden Lamellenkante deutlich ab. Die Ergebnisse der Oberflächenrauheit, der chemische Zusammensetzung, des Gefüge und des Verschleißes werden im Abschnitt 3.9.5 diskutiert.

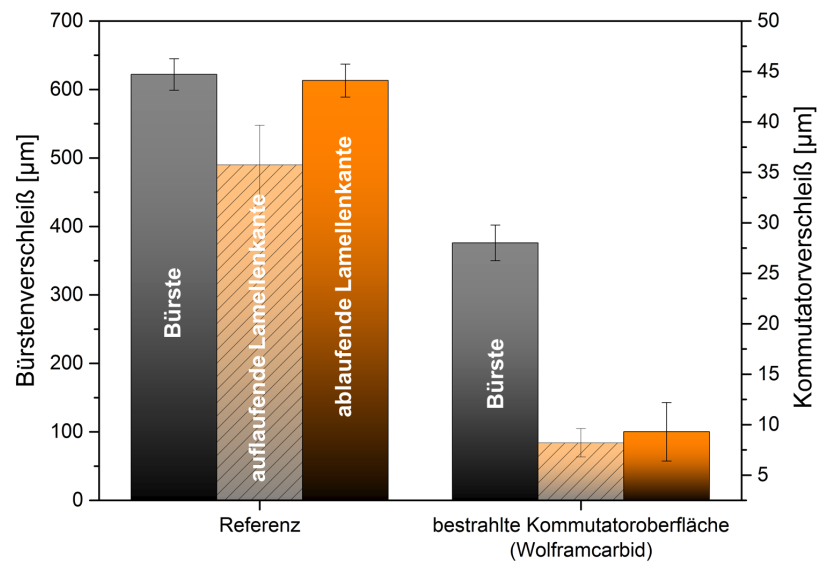


Abbildung 3.21: Absoluter Verschleiß der Kohlebürste (linke Achse), auflaufende und ablaufende Lamellenkante des Kommutators (rechte Achse) nach einem Dauerlauf. Das Diagramm stellt einen Vergleich des Verschleißes zwischen einer unbearbeiteten (Referenz) und bestrahlten Kommutatoroberfläche dar.

3.9 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die erzielten Ergebnisse der Bürsten mit unterschiedlichen Pressrichtungen für stromlose und bestromte Versuche, sowie für Versuche mit Kommutierungsstrom eingehend betrachtet und diskutiert. Es soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Pressrichtung auf das Verhalten des Tribosystems hat. Zur Berechnung der Kontakttemperatur wird das im Abschnitt 2.3 vorgestellte Modell angewandt. Abschließend soll die Veränderung durch partikelbestrahlte Kommutatoroberflächen auf den Verschleiß des Systems interpretiert werden.

3.9.1 Beurteilung der Materialorientierung in der Kohlebürste

Die Bürstenmaterialien werden beim Herstellungsprozess zur Formgebung gepresst. Dabei orientieren sich die Bürstenwerkstoffe (Graphit und Kupferzusätze) im idealen Fall senkrecht zur Pressrichtung. Die in dieser Arbeit untersuchten Kohlebürsten zeigten eine annähernde Ausrichtung der Kupferpartikel, wie in Abb. 3.5 gezeigt wurde. Statistisch zeigen die Graphitebenen eine Vorzugsrichtung. Jedoch weicht Graphit an lokalen Stellen von der Soll-Ausrichtung ab. Die ungeordnete Graphitorientierung kann durch die härteren Kupferpartikel beeinflusst werden. Kommt es zum gegenseitigen Druck mit statistisch orientierten Kupferpartikeln, richten sich die dazwischenliegenden Graphitlamellen entsprechend der Orientierung des Kupfers aus. Allerdings orientieren sich die Kupferpartikel in der axialen und radialen Bürste annähernd senkrecht zur Pressrichtung (Abb. 3.4 a und b). Die tangential gepresste Bürste zeigte überwiegend runde Kupferpartikel auf der Schliiffseite. Diese resultieren aus der geschliffenen Bürstenseite, auf der die Kupferpartikel mit ihrer längsten Dimension zur Messfläche liegen (siehe Abb. 3.4 c). Des Weiteren wiesen die Kohlebürsten stellenweise kein Kupfer auf (siehe Abb. 3.4). Der Mischungsprozess ist hierbei ein entscheidender Faktor. Dadurch können Kupferarmutzzonen entstehen.

3.9.2 Einfluss der Pressrichtung auf das Bürstenverhalten bei stromlosen Versuchen

Eine axiale Kohlebürste zeigte nach dem Reibungsversuch eine Verformung der Graphitebenen parallel zur Kontaktfläche (siehe Abb. 3.8). Das ungeordnete Graphit konnte sich im Reibkontakt parallel zur Oberfläche durch plastische Verformung ausrichten. Dieses Phänomen wurde bei Graphitproben [64] nach dem Reibvorgang beobachtet. Die Verformung des Graphits kann durch die Reibungstemperatur begünstigt werden. Hierbei trägt die zugeführte Energie zum Brechen der Bindungen zwischen den Graphitebenen bei, welche die Biegefestigkeit des Graphits verringern kann [64]. Aus diesem Grund weisen die Bürsten mit unterschiedlicher Materialorientierung nach dem Reibvorgang keine Unterschiede an der Reibfläche auf.

Die tangentiale Bürste zeigte während des Reibungsversuchs einen höheren Reibwert und eine höhere Temperatur gegenüber anderer Bürsten. Der gemessene mittlere Reibungskoeffizient μ betrug nach 100 Stunden für die axiale Bürste 0,24, für die radiale Bürste 0,09 und für die tangentiale Bürste 0,36.

Angelehnt an die analytischen Messverfahren sowie an die Reibkoeffizienten der Prüfstandsversuche treten bei der verschiedenen Materialorientierungen der Kohlebürsten drei ver-

schiedene Reibmechanismen im tribologischen Kontakt auf. Die radiale Bürste befindet sich in einem günstigen Zustand, wie in Abb. 3.22 links schematisch gezeigt wird. Dabei können die zur Kontaktfläche parallel orientierten Graphitlamellen aufgrund der wirkenden Van-der-Waals Kräfte leicht voneinander abgeschert werden. In diesem Fall muss keine Verformung der Graphitlamellen erfolgen und somit keine zusätzliche Arbeit verrichtet werden. Im Gegensatz dazu wird mehr Energie für die Deformation der Graphitebenen bei der axialen und tangentialen Bürste umgesetzt. Dieser Effekt ist ein Grund für die hohen gemessenen Reibwerte der axialen und tangentialen Bürste sein. Des Weiteren benötigt die Verformung der Graphitlamellen der tangentialen Bürste mehr Energie, als die der axialen Bürste, da die Graphitlamellen über ihre gesamte Länge senkrecht zur Laufrichtung auf der Kommutatoroberfläche reiben. Hier ist das E-Modul des Graphits ein entscheidender Faktor. Das E-Modul ist entlang der Graphitebene nahezu so groß, wie der E-Modul des härtesten Materials Diamant [68][S. 192]. Durch diesen Effekt steigt die Scherspannung zwischen den Reibkontakten wesentlich an und führt zu hohen Reibkräften.

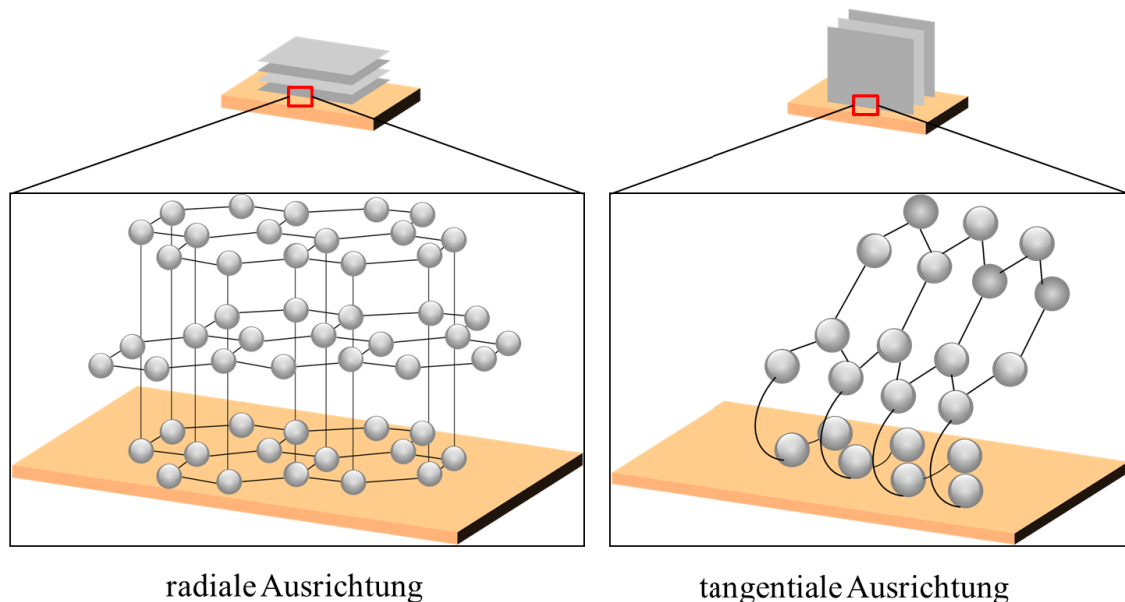


Abbildung 3.22: Schematische Darstellung des Graphit-Kupfer-Kontakts einer radialen gepressten Bürste (links) und einer tangential gepressten Bürste (rechts). Während der Reibung beider Körper deformieren sich die Graphitebenen im Kontakt parallel zur Kontaktfläche (rechtes Bild). Bei der radialen Bürste können die Graphitebenen im Kontaktbereich leicht abscheren (linkes Bild).

Die tangentiale Bürste hat sich an der Messstelle aufgrund der Reibung um 40 °C erwärmt. An der Grenzfläche zwischen der Kohlebürste und dem Kommutator wird durch die Reibung Wärmeenergie freigesetzt. Die erzeugte Wärme wird aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Kupfers in den Kommutator abgeleitet. Hierbei entsteht die maximale Reibungstemperatur im Kontakt, obwohl ein Teil der Wärme auch in die Bürste abgeleitet wird. Folglich beträgt die gemessene Reibungstemperatur in der Bürste aufgrund der im Kontakt erzeugten Wärme sowie der von der Bürste in dem Kommutator geleiteten Wärme nur einen Bruchteil

3 Pressrichtung der Bürsten

der im Kontakt erzeugten Wärme. Die Wärme ist durch die Rauheit der Oberflächen inhomogen verteilt. Sie tritt an den Mikrospitzen der Körper, welche im Kontakt stehen, auf. Diese Spitzen haben jedoch durch die Gleitbewegung eine begrenzte Lebensdauer. Durch die Bewegung wechselt die lokale Temperaturerhöhung ständig ihre Lage. Aus diesem Grund ist die Messung der Temperaturerhöhung im Mikrokontakt unmöglich. Dennoch ist ihre Größe von großer Bedeutung. Abhängig von der erzeugten Kontakttemperatur trägt die Wärme zur Oxidation und zum Schmelzen des Werkstoffs bei. Zur Abschätzung der Reibungswärme werden Berechnungen zur Kontakttemperatur jeweils für einen elastischen und einen plastischen Kontakt durchgeführt. Diese basieren auf dem im Abschnitt 2.3 vorgestellten Modell. Die Festlegung der Materialwerte sind in Tabelle 3.10 vorgestellt.

Zeichen	Einheit	Erläuterung	Kohlebürste	Kommutator
λ	W/(m °K)	Wärmeleitfähigkeit	60	392 [69]
c	J/(m³ °K)	Wärmespeicherzahl	$1,6 \times 10^6$ [51]	$3,4 \times 10^6$ [51]
E	N/mm²	Elastizitätsmodul	1402 5.3	118000 [69]
γ	Kg/m³	Materialdichte	$2,26 \times 10^3$ [16]	$8,94 \times 10^3$ [21]
H	N/m²	Kontakthärte	2×10^8 [51]	$5,5 \times 10^8$ [51]
ρ	Ωm	spez. elektr. Widerstand	siehe [3.12]	$1,7 \times 10^{-8}$ [21]
ξ	-	Elastizitätsfaktor	1 [52]	-

Tabelle 3.10: Werkstoffkonstante der Kohlebürste, sowie des Kupfers für die Berechnung des Modells.

Die Reibungstemperatur ist nach Gl. 2.45 proportional zu der Normalkraft F_N , dem Reibungskoeffizienten μ , sowie zu der Geschwindigkeit v und antiproportional zu der Wärmeleitfähigkeit λ und zum Radius der mechanischen Kontaktfläche a_m . Im Falle der radial gepressten Bürste ist die Reibungstemperatur proportional zur Anzahl der Graphitebenen n (Gl. 3.12). Im Gegensatz dazu verhält sich die Reibungstemperatur bei der axial und tangential gepressten Bürsten nach Gl. 3.11 antiproportional zu n . Die Berechnung wird zunächst für $n = 1$ (Anzahl der Graphitebenen) durchgeführt. Bei allen Bürsten verschiedener Pressung wurden die Normalkraft und die Geschwindigkeit als Konstante angenommen. Der Reibungskoeffizient ist für die Berechnung der Reibungswärme eine entscheidende Größe, dessen gemessene Werte aus der Tabelle 3.11 zu entnehmen sind. In Tabelle 6.2 (Anhang A) sind die erforderlichen Zwischenschritte zur Berechnung der Temperaturerhöhung durch die Reibung dargestellt.

Versuch	Reibungskoeffizient μ
axial	0,24
radial	0,09
tangential	0,36

Tabelle 3.11: Mittlerer Reibungskoeffizient für die Berechnung der Reibungstemperatur.

Abb. 3.23 zeigt den Vergleich zwischen den experimentellen Messwerten und den errechneten Temperaturerhöhungen bei einem elastischen und einem plastischen Kontaktfall. Die Berechnung der Reibungstemperatur zeigt, dass die Erwärmung des Kontakts von der Ma-

terialausrichtung abhängig ist. Die berechnete Temperaturerhöhung sinkt bei den radialen Bürsten in beiden Fällen ab. Die Temperatur steigt bei der tangential gepressten Bürste. Es ist zu erkennen, dass die Anordnung der Modellwerte mit den experimentellen Resultaten übereinstimmt. Weiterhin zeigt der Vergleich zwischen dem elastischen und plastischen Kontakt, dass die Wärmefreisetzung in einem elastischen Kontakt höher, als im plastischen Fall ist. Dieser Effekt beruht auf den berechneten realen Kontaktflächen. Abhängig von den Eingangsparametern ist die reale Kontaktfläche im elastischen Kontakt halb so groß, wie im plastischen Kontakt. Erhöht sich die Kontaktfläche zwischen den Kontaktpartnern wird mehr Wärme aus der Kontaktfläche abgeleitet.

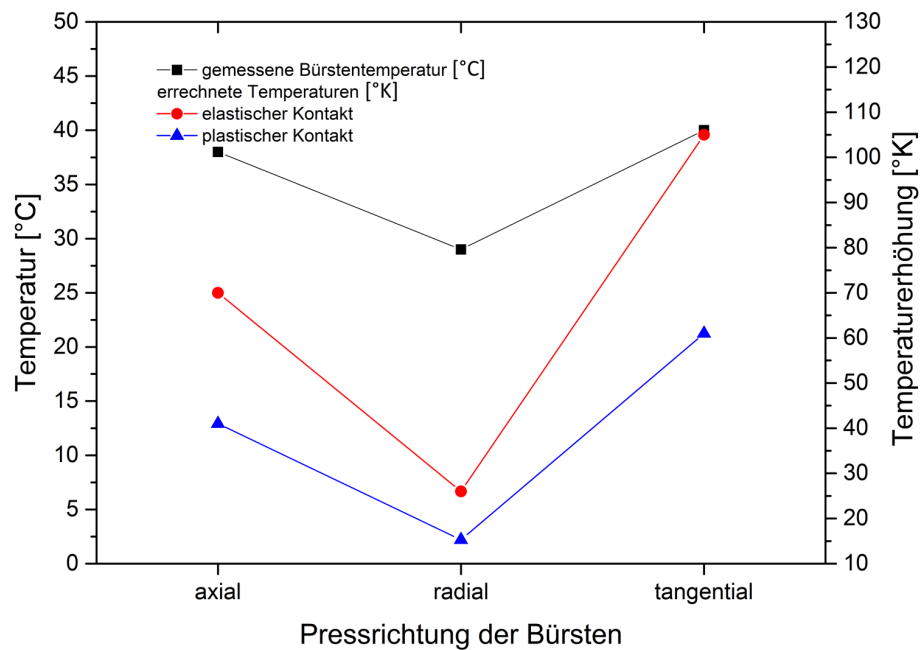


Abbildung 3.23: Errechnete Temperaturerhöhung durch die Reibung (nach Gl. 2.45) in Abhängigkeit der Pressrichtung der Bürsten (linke y-Achse). Vergleich mit der gemessenen Bürstentemperatur während des Reibungsversuchs (rechte y-Achse).

3.9.3 Wärmeleitung, abhängig von der Werkstofforientierung und Anzahl der Graphitebenen

Bisher wurde die Berechnung der Kontakttemperatur unabhängig von der Anzahl der Graphitebenen in der Kontaktfläche betrachtet. Die Kontaktfläche zwischen der Bürste und dem Kommutator setzt sich in der Realität jedoch aus mehreren Graphitebenen zusammen, welche unterschiedlich orientiert vorliegen können. Aufgrunddessen wird im Folgenden das in Kapitel 2 dargestellte Holm-Modell durch die Orientierung des Graphits erweitert. Für die Berechnung der Kontakttemperatur wird angenommen, dass sich die Graphitlamellen in der Kontaktfläche entsprechend der Pressrichtung ausrichten. Die Orientierung der Graphitlamellen erfolgt bei den axialen und tangentialen Bürsten senkrecht und bei den radialen Bürsten parallel zur Kontaktfläche. Dabei ändert sich entsprechend die Wärmeleitfähigkeit senkrecht und parallel zur Materialorientierung. Es wird angenommen, dass die Temperaturverteilung zeitunabhängig ist und keine innere Wärmequelle vorhanden ist. Abb. 3.24 zeigt

3 Pressrichtung der Bürsten

eine schematische Darstellung zweier Körper mit unterschiedlicher Materialausrichtung.

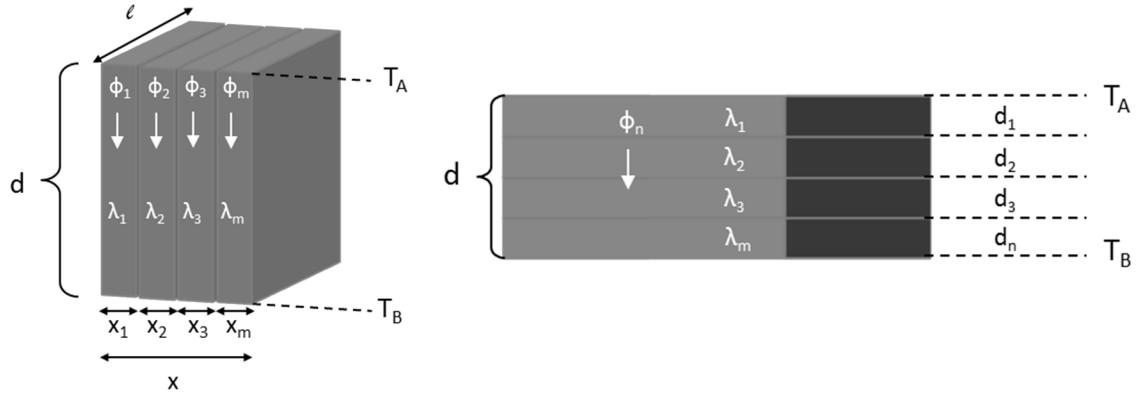


Abbildung 3.24: Schematische Darstellung des Wärmestroms parallel (links) und orthogonal (rechts) zur Materialorientierung [70][S. 11].

Das linke Bild stellt einen Körper mit m Ebenen mit der jeweiligen Breite x_m und der Wärmeleitfähigkeit λ_m orthogonal zur Kontaktfläche dar. Die gesamte Breite x ist die Summe aller Breiten der Teilebenen. Kommt es zu einer Temperaturdifferenz zwischen A und B ($T_A > T_B$), fließt Wärme in Richtung B ab. Der einzelne Teilwärmestrom beträgt

$$\Phi_m = \lambda_m \cdot \frac{x_m \cdot l}{d} \cdot (T_A - T_B), \quad (3.4)$$

wobei l eine Länge ist, die orthogonal zur Zeichenebene liegt.

Der gesamte Wärmestrom, der parallel zur Materialorientierung abfließt, ergibt sich nach der Formel

$$\Phi = \lambda_p \cdot \frac{x \cdot l}{d} \cdot (T_A - T_B), \quad (3.5)$$

wobei sich die Wärmeleitfähigkeit λ_p parallel zur Materialorientierung befindet.

Aus den Gleichungen 3.4 und 3.5 lässt sich die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Materialorientierung durch

$$\lambda_p = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot x_i}{x} \quad (3.6)$$

berechnen.

Es wird angenommen, dass alle Graphitebenen die gleiche Breite x und dieselbe Wärmeleitfähigkeit λ_C besitzen. Dann ist λ_p nach Gleichung 3.7 proportional zur Anzahl der Graphitebenen.

$$\lambda_p = n \cdot \lambda_C \quad (3.7)$$

Fließt, gemäß Abb. 3.24 rechts, der Wärmestrom von der Ebene A mit der Temperatur T_A und der Ebene B mit der Temperatur T_B orthogonal zur Materialorientierung ab, dann weisen die einzelnen Teilebenen dieselbe Wärmestromdichte auf.

$$q = \frac{\lambda_s}{d} \cdot (T_A - T_B) \quad (3.8)$$

Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_s orthogonal zur Materialorientierung lässt sich nach der Gleichung beschreiben:

$$\lambda_s = \frac{d}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (3.9)$$

Besitzen die Teilebenen dieselbe Dicke, bzw. die gleiche Wärmeleitfähigkeit, so lässt sich die Gleichung wie folgt vereinfachen:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_C}{n} \quad (3.10)$$

Daraus lässt sich erkennen, dass die gesamte Wärmeleitfähigkeit λ_s aufgrund der in Serie geschalteten Widerstände mit zunehmenden Graphitebenen abnimmt.

Im Falle der Werkstofforientierung senkrecht, bzw. parallel zur Reibfläche lässt sich die Reibungstemperatur analog zu Formel 2.45 durch

$$T_{rs} = \frac{F_N \cdot \mu \cdot \nu}{4 \cdot n \cdot \lambda \cdot a} \quad (3.11)$$

und

$$T_{rp} = \frac{F_N \cdot \mu \cdot \nu}{4 \cdot \frac{\lambda}{n} \cdot a} \quad (3.12)$$

berechnen. Hier ist n die Anzahl der Graphitebenen im Kontakt.

3.9.3.1 Berechnung der Kontakttemperatur abhängig von der Anzahl der Graphitebenen

Abb. 3.25 zeigt die errechnete Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Anzahl der Graphitebenen für alle Pressungen nach Gl. 3.11 und Gl. 3.12. Erhöht sich die Anzahl der Graphitebenen n im betrachteten Kontakt, nimmt die Temperatur für die axiale und tangentialen Bürste ab. Gleichzeitig erhöht sich die Kontakttemperatur bei der radialen Bürste. Für $n = 1$ dominiert der Reibungskoeffizient für die Berechnung der mittleren Temperaturerhöhung. Aus diesem Grund liegt bei dem elastischen und plastischen Kontakt die Temperaturerhöhung der radialen Bürste unter der der anderen Pressrichtungen. Nimmt die Anzahl der Graphitebenen zu, wird der Faktor n für die Berechnung wichtig. Hierbei nimmt die Temperatur im Kontakt der radialen Bürste zu, während sie im Kontakt der axialen und tangentialen Bürste absinkt.

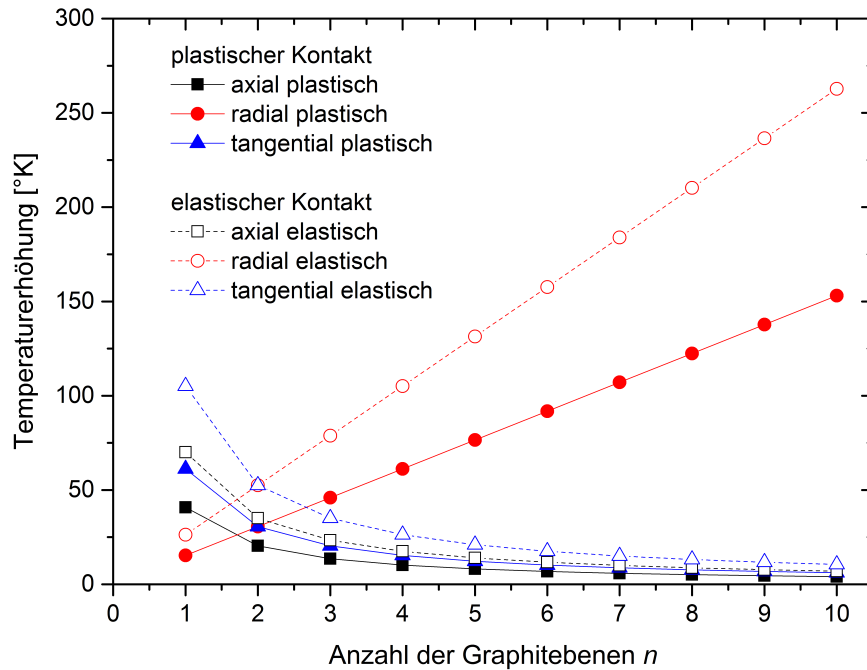


Abbildung 3.25: Einfluss der Anzahl der Graphitebenen auf die errechnete Temperaturerhöhung im elastischen und plastischen Kontakt.

3.9.4 Einfluss des Stroms auf das Bürstenverhalten mit unterschiedlichen Pressrichtungen

Die Graphitlamellen wurden durch die Rotationsbewegung des Kommutators parallel zur Oberfläche plastisch verformt. Dieser Effekt wurde mittels REM-Analyse in Abb. 3.12 a und Abb. 3.12 c bei den axial und tangential gepressten Bürsten nach dem Versuchsende beobachtet. Infolgedessen wird davon ausgegangen, dass keine Unterschiede bezüglich der Graphitorientierung an der Kontaktfläche zwischen den Bürsten vorhanden sind. Allerdings erwärmten sich die Kohlebürsten unterschiedlich. Für eine Versuchsdauer $t \leq 80$ h lag die Bürstentemperatur der tangentialen Bürste über der Temperatur der radialen Bürste, obwohl der Spannungsabfall der radialen Bürste höher war. Dies resultiert aus der erzeugten Reibungswärme und des hohen Reibungskoeffizienten der tangentialen Bürste. Der Widerstand, sowie die Bürstentemperatur stiegen, wie aus Abb. 3.9 entnommen werden kann, mit zunehmender Zeit exponentiell an. Dieser Anstieg kann durch die Entstehung der Patina auf der Oberfläche des Kommutators erklärt werden. Die Patina setzt sich aus Kupferoxiden und Kohlenstoff zusammen und hat folglich halbleitende Eigenschaften. Eine Erklärung für die Erhöhung des Widerstands besteht durch die Minderung der Anpresskraft der Bürste aufgrund des Verschleißes. Der Kontaktwiderstand nimmt mit abnehmender Kontaktkraft zu [38]. Die Verschleißrate der Bürsten zeigte in den ersten 20 Stunden den höchsten Wert an (Abb. 3.9 c). Allerdings nahmen die Verschleißraten mit kontinuierlicher Versuchsdauer ab. In der Einlaufzeit weist die Fläche zwischen dem Kommutator und der Bürste aufgrund des Oberflächenprofils einen kleinen Kontakt auf. Hierbei nimmt die Stromdichte in den einzelnen Strombrücken zu und verkürzt somit die Lebensdauer der realen Kontaktstellen, da die Temperatur die Schmelztemperatur des Werkstoffs erreicht. Dadurch wechseln die Strom-

brücken ihre Lage und führen zur Aufrauhung der Kontaktfläche, welche zum zunehmenden Verschleiß der Bürste führt. Vergrößert sich die reale Kontaktfläche nach dem Einlaufen des Reibpartners, nimmt die Anzahl der Strombrücken durch die Reduzierung der Rauheit zu. Demzufolge verteilt sich der Strom über die Strombrücken und verlängert somit ihre Lebensdauer. Eine weitere Erklärung zur Abnahme des Verschleißes ist die Entstehung der Patina auf der Kommutatoroberfläche. Da die Patina überwiegend aus Kohlenstoff besteht, weist sie die Eigenschaften eines Schmiermittels auf. Dadurch reduziert sich der Reibwert und führt somit zu besseren Gleiteigenschaften.

Die Bürsten verschiedener Pressung wiesen keine belastbaren Unterschiede im Verschleißwert auf. Allerdings zeigte die radiale Bürste die größte Temperaturerhöhung (Abb. 3.9 b). Der Temperaturanstieg resultiert einerseits aus dem hohen Längswiderstand der Materialorientierung in den radialen Bürsten (Tabelle 3.4) und andererseits aus der gemessenen hohen Rauheit der Kontaktflächen der Proben. Die radiale Bürste, sowie der Kommutator zeigten die höchste Rauheit der Kontaktflächen (Abb. 6.2). Bei UENO [71] führten die rauen Kontaktflächen zur Reduzierung der realen Kontaktfläche und damit zur Erhöhung des Kontaktwiderstands und der Temperatur.

Zur Abschätzung des Temperaturanstiegs im Kontakt wird für die axiale, radiale und tangential Bürste die Berechnung nach dem Modell von HOLM durchgeführt. In Tabelle 3.10 sind die Materialdaten des Graphits und des Kupfers aufgeführt. Des Weiteren zeigt Tabelle 3.12 die gemittelten Messgrößen, die zur Berechnung der Kontakttemperatur verwendet werden.

gemessene Parameter	axial	radial	tangential
Kontaktspannung U_K [V]	0,56	0,61	0,57
Kontaktstrom I_K [A]	3,53	3,5	3,53
spez. elektrischer Widerstand ρ_C [$\Omega \cdot m$]	$0,7 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$0,7 \times 10^{-6}$
Reibungskoeffizient μ	0,24	0,09	0,36
Bürstentemperatur T_C [$^{\circ}C$]	75	83	80
Geschwindigkeit v [m/s]	1		
Kontaktkraft F_N [N]	3		
Spannungsabfall über der Fremdschicht U_F [V]	0,1		

Tabelle 3.12: Gemessene Parameter zur Berechnung der Kontakttemperatur.

Zunächst wird die maximale Kontakttemperatur T_{θ} für einen ruhenden Kontakt berechnet. Weiterhin werden die Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Zeit berechnet. Die Reibungstemperatur ist dem vorherigen Abschnitt Abb. 3.23 zu entnehmen. Schließlich wird die Reibungstemperatur und die, durch die Stromverluste resultierende Temperatur, summiert.

3 Pressrichtung der Bürsten

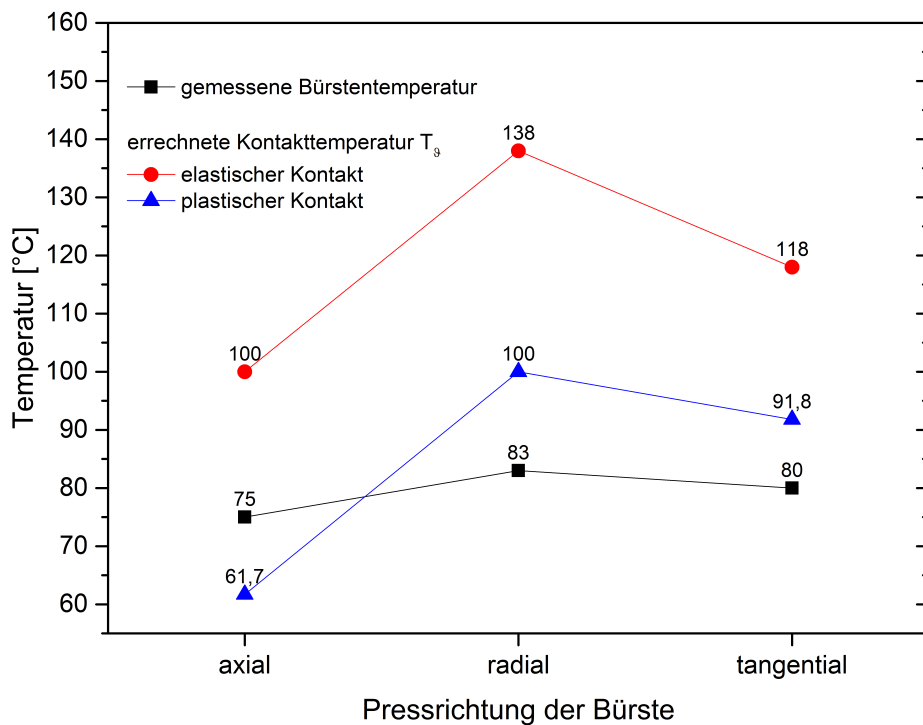


Abbildung 3.26: Errechnete maximale Kontakttemperatur nach dem Modell von HOLM, jeweils im elastischen und plastischen Zustand.

Abb. 3.26 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen Bürstentemperaturen und den errechneten Kontakttemperaturen, jeweils im elastischen und plastischen Zustand. Aus der Abb. 3.26 links ist zu erkennen, dass die Modellwerte der Kontakttemperatur $T_{\vartheta ges}$ des plastischen Kontakts näher zu den gemessenen Temperaturwerten liegen als zu den Temperaturen, die im Fall des elastischen Kontakt resultierten.

Die höchste berechnete Kontakttemperatur weist die radiale Bürste auf. Diese liegt bei ca. 100 °C im plastischen Kontakt und ca. 138 °C im elastischen Kontakt. Der wichtigste Einflussfaktor für die Berechnung ist die gemessene Kontaktspannung, da die radiale Bürste den höchsten Spannungsabfall aufweist. Der Spannungsabfall resultiert aus der Orientierung des Materials im Bürstenkörper, welcher quer zum Stromfluss von der Kupferlitze zur Kontaktfläche der Bürsten verläuft. Die niedrigste errechnete Kontakttemperatur zeigt die axiale Bürste. Die Zuordnung der errechneten Temperaturen mit steigendem Temperaturwert stimmt mit der gemessenen Bürstentemperatur bei den Versuchen nach 100 Stunden überein (Abb. 3.9 c). Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß des Systems (Abb. 3.27). Bei hoher Temperatur nimmt das Wachstum der Patina, welche halbleitende Eigenschaften besitzt, zu. Dadurch wandern mehr Kupferionen aus der Kupfermatrix zur Oberfläche. Dort reagiert Kupfer mit den Sauerstoffatomen. Das trägt zum Wachsen der Patina bei. Die Patina wiederum erhöht den elektrischen Kontaktwiderstand, welcher ein entscheidender Faktor für die Kontakttemperatur ist. Des Weiteren hängt der Reibwert von der Kontakttemperatur stark ab. Übersteigt die Kontakttemperatur die Siedetemperatur des Wassers, führt dies zum Verdampfen der Wasserhaut, welche für bessere Gleiteigenschaften des Systems sorgt. Als Folge steigen die Reibwerte wesentlich an. Weiterhin kann eine hohe Kontakttemperatur zur Oxidation des Graphits führen. Als Folge

verschlechtern sich die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Graphits. Mit zunehmender Oxidation des Graphits nehmen der Spannungsabfall, sowie die Temperatur der Bürste zu, welche die Eigenschaften des Tribosystems durch die Beschleunigung des Patinawachstums begünstigen und damit den Verschleiß beeinträchtigen. Die dickste Patina wurde auf der Oberfläche des Kommutators mit radialen Bürsten nachgewiesen (Abb. 3.10 und Tabelle 3.6).

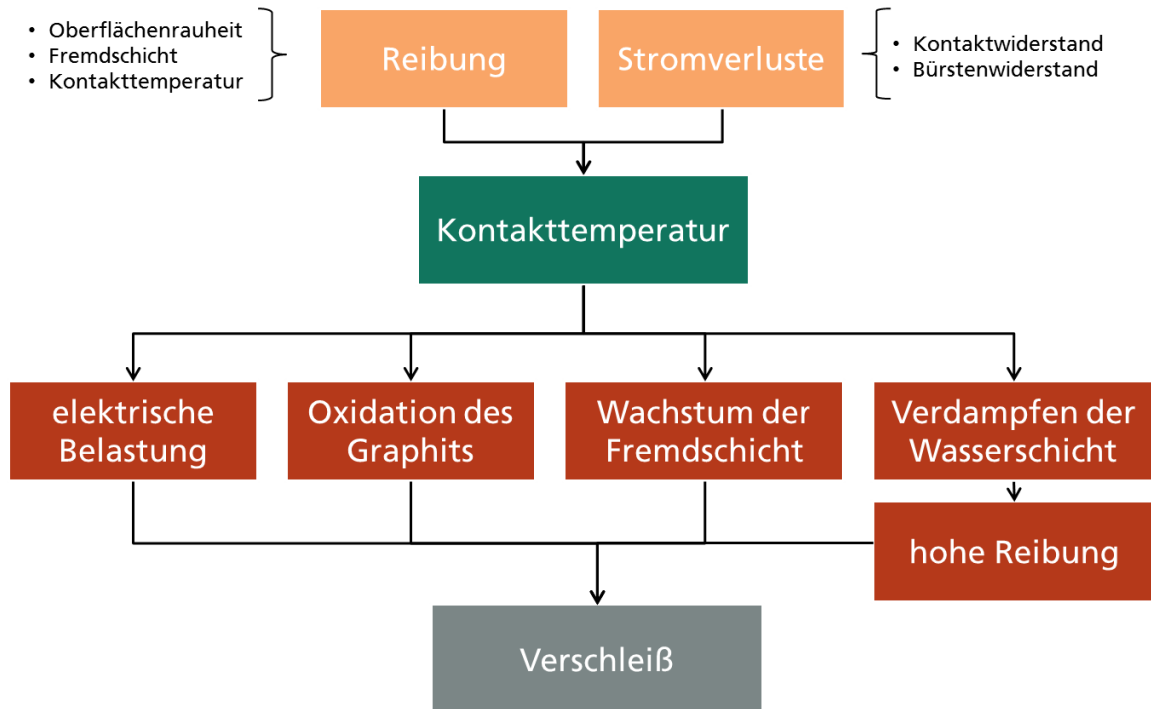


Abbildung 3.27: Einfluss der Kontakttemperatur auf den Bürsten-Kommutator-Kontakt.

3.9.5 Einfluss des Kommutierungsstroms auf das Tribosystem in Abhängigkeit der Materialorientierung

In der Annahme, dass die Verschleißraten des Systems über die gesamte Laufzeit konstant waren, ergeben sich die mittleren Verschleißraten aus den Dauerlaufversuchen (Abb. 3.28). Dabei ist eine Zunahme des Verschleißes im Vergleich zu den Versuchen ohne Kommutierung zu erkennen. Der Bürstenverschleiß am DLP war um den Faktor 17 höher, als der Bürstenverschleiß am KBP. Der Verschleiß des Kommutators stieg gleichzeitig um Faktor 5. Dieser Effekt wurde durch den erhöhten Strom und die höhere Drehzahl bei der Kommutierung verursacht. Der gemessene Strom am DLP war um 2,5 A höher, als am KBP. Die gemessene Drehzahl stieg einhergehend um 500 min^{-1} .

3 Pressrichtung der Bürsten

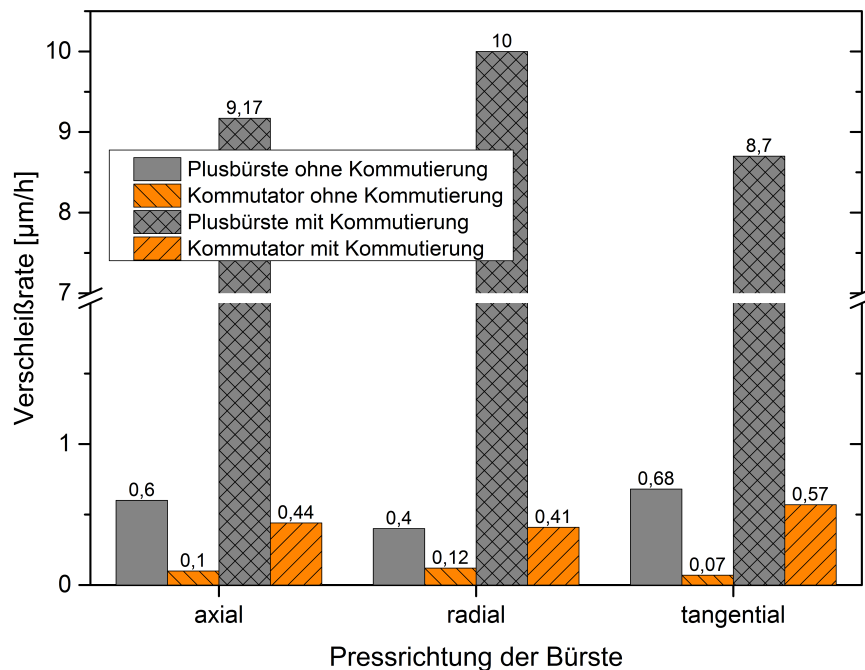


Abbildung 3.28: Einfluss der Kommutierung auf den Verschleiß des Tribosystems.

Die REM- und EDX-Analyse zeigten, dass das Kupfer an der ablaufenden Kante der Kommutatorlamelle geschmolzen war. Um das Kupfer zu verflüssigen, muss mindestens die Schmelztemperatur von 1083 °C erreicht werden. Die Begründung für das Erreichen der Schmelztemperatur kann durch auftretende Lichtbögen gegeben werden. Das Auftreten von Lichtbögen im Kohlebürste-Kommutator-System erfolgt durch die unvollständige Kommutierung, der Kontamination aus der Umgebung, der Vibration und der niedrigen Anpresskraft der Bürste. Da die Versuche ohne Kommutierung am KBP unter gleichen Bedingungen und in derselben Laboratmosphäre erfolgten, wird davon ausgegangen, dass der Effekt durch Lichtbögen über andere mögliche Einflussgrößen dominiert. Hierbei wird die in der Spule gespeicherte elektrische Energie in Form von einem Lichtbogen auf den Kommutatorlamellen übertragen. Infolge einer unvollständigen Stromkommutierung führen die Lichtbögen zu einer gestiegenen Erosion des Kontakts. Für ein Auftreten eines Lichtbogens in einem Kommutator-Bürste-Kontakt ist eine Zündspannung von ca. 14 V erforderlich [8][S. 33]. Dadurch erhitzt sich das Kupfer am Fußpunkt des Lichtbogens, bis die Schmelztemperatur erreicht wird. Das Kupfer wird vom festen Aggregatzustand zum flüssigen umgewandelt. An der Bürstenseite oxidiert, bzw. verdampft der Kohlenstoff und verschlechtert somit seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Durch die Erosion an der ablaufenden Lamellenkante entsteht ein ungleichmäßiger Materialabtrag innerhalb einer Lamellenoberfläche (Tabelle 3.8). Der ungleichmäßige Verschleiß der Lamelle führt zur Kontakttrennung zwischen der Bürste und der Kommutatorlamelle an der erodierten Zone, welche wiederum das Auftreten der Lichtbögen verstärkt. Abb. 3.29 zeigt eine schematische Darstellung dieses Effekts. Der in der erodierten Zone fehlende mechanische Kontakt kann in den Aufnahmen der Oberflächenstruktur erkannt werden (Abb. 3.14). Hierbei fehlen die abrasiven Riefen, wodurch die entstandene Fremdschicht nicht abgetragen werden kann. Die Dicke der Patina in der erodierten Zone (ablaufende Kante) ist überwiegend höher als, die in der mechanischen

Zone (auflaufende Kante in Abb. 3.17). Ein weiterer Unterschied zwischen der erodierten und der mechanischen Zone ist durch eine Gefügeänderung gekennzeichnet. In der mechanischen Zone lässt sich eine Kornverfeinerung erkennen (Abb. 3.16, linke Spalte). In der erodierten Zone hingegen tritt dieser Effekt nicht auf. Durch die Reibung in der mechanischen Zone wird das Kupfer plastisch verformt. Bei der plastischen Verformung müssen die Körner des Kupfers ihre Form ändern. Dieses geschieht, wenn sich im Korn Versetzungen bewegen. Die Versetzungen werden an der Korngrenze aufgestaut. Dieser Prozess führt zur Verkleinerung der Korngröße. Dadurch verfestigt sich das Kupfer nach der Hall-Petch-Beziehung und minimiert sich der Verschleiß [72]. In der erodierten Zone tritt ein anderer Mechanismus auf. Durch den fehlenden mechanischen Kontakt und durch die zugeführte Lichtbögenwärme können thermische Prozesse durch Umlagerung, bzw. Verschwendung der Versetzungen in den Körnern der Verfestigung entgegenwirken. Dieser Vorgang wird Rekristallisation genannt. Bei der Rekristallisation entsteht die Kornneubildung durch die Bewegung von Korngrenzen. Für diesen Prozess ist eine Rekristallisationstemperatur von etwa 270°C nötig, dessen Wert ca. 40 % der Schmelztemperatur des Kupfers beträgt (TAMMANNsche Regel) [69].

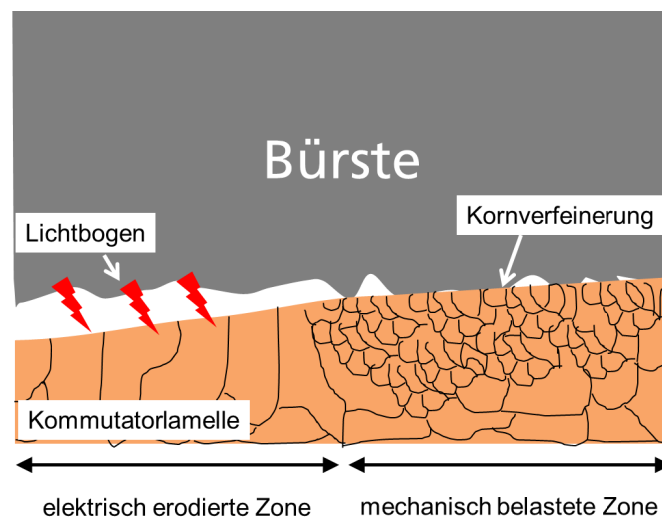


Abbildung 3.29: Schematische Darstellung zur Kontakttrennung an der ablaufenden Lamellenkante aufgrund des ungleichmäßigen Verschleißes.

Die Orientierung des Bürstenmaterials mit unterschiedlicher Pressrichtung beeinflusst die Stromwendung und somit den Verschleiß. Für eine gute Kommutierung ist ein hoher Bürstenquerwiderstand, der in Richtung des Kurzschlussstroms wirksam wird, erforderlich [8][S. 64]. Dadurch wird die Kommutierungszeit verlängert und die beschleunigte Kommutierung beseitigt. Die radial gepresste Bürste besitzt einen niedrigen Querwiderstand (Tabelle. 3.4). Folglich verläuft der Kurzschlussstrom nahe der Kontaktfläche, da der Längswiderstand höher ist und gegen den Ankerstrom von der Bürstenlitze zur Kontaktfläche hin wirkt. Die Stromlinien konzentrieren sich in einem oberflächennahen Bereich und tragen zur Erwärmung der Bürstenkontaktfläche bei. Infolgedessen verschlechtern sich die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der radialen Bürste, welches zu hohem Verschleiß führt (Abb. 3.29). Die axiale und die tangential Bürste besitzen aufgrund der Materialorientierung in Richtung des Kurzschlussstroms einen höheren Widerstand bezüglich des Längswiderstands. Durch

3 Pressrichtung der Bürsten

die Materialorientierung können sich die Stromlinien tiefer in den Bürsten verteilen. Eine schematische Darstellung zur Konzentration der Stromlinien im oberflächennahen Bereich der radial gepressten Bürste ist in Abb. 3.30 dargestellt.

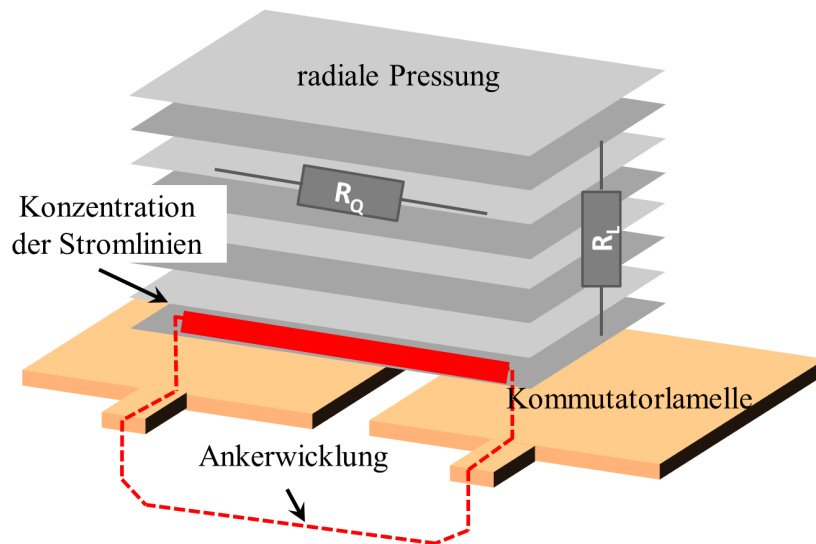


Abbildung 3.30: Schematische Darstellung des Verlaufs des Kurzschlussstroms bei der radial gepressten Bürste.

Bezüglich der, durch die unvollständige Kommutierung entstandenen Lichtbögen, kommt es beim Kommutator zu einem ungleichmäßigen Verschleiß der Lamellen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken und die Festigkeit des Kupfers zu steigern, wurden die Kommutatorlamellen mit Wolframcarbid bestrahlt. Das Bestrahlen der Kuperoberfläche unter hohem Druck führt zur plastischen Verformung und Verkleinerung der Korngröße des Kommutators. Nach der Hall-Petch-Beziehung erhöht sich die Widerstandsfähigkeit des Kupfers gegenüber plastischer Verformung und führt zu einer Festigkeitssteigerung. Dabei verformt sich die Oberfläche erst bei größeren Belastungen. Nach dem Strahlprozess wurde die Festigkeit des Kupfers mit einem FIB-Schnitt (Abb. 3.19) und hinsichtlich der Kornverfeinerung qualitativ beurteilt. Die Analyse zeigt, dass Fremdkörner (Wolframcarbid) in das Kupfergefüge eingearbeitet wurden. XPS Analysen bestätigen zusätzlich die Einarbeitung des Wolframcarbids in das Kupfergefüge. Wolframcarbid ist ein hartes Material und weist eine hohe Verschleißfestigkeit auf. Die Dauerlaufversuche mit E-Motoren und einer bestrahlten Kommutatoroberfläche zeigten einen geringeren Kommutator- und Bürstenverschleiß. Des Weiteren verringerte sich die Verschleißdifferenz zwischen der ablaufenden und auflaufenden Lamellenkante um eine Größenordnung. Der Materialverlust in der erodierten Zone verringert sich zum einen durch die hohe Festigkeit der mit Wolframcarbid bestrahlten Lamelle und zum anderen durch seine hohe Entfestigungstemperatur ($> 1000\text{ °C}$) und der hohen Schmelztemperatur ($> 2800\text{ °C}$) [27]. Im Gegensatz dazu liegen die Entfestigungs- und Schmelztemperaturen von Kupfer bei 190 °C und 1083 °C . Die Verringerung des Verschleißes an der ablaufenden Kante führt zu einer Reduzierung der Verschleißpartikel im Kontakt und einem gleichmäßigen Lamel-

lenverschleiß. Aus der Verschleißminimierung resultiert eine Minderung der Lichtbögen im Kontakt.

3.10 Kurzzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der unterschiedlichen Pressrichtungen der Kohlebürsten auf das Verhalten des tribologischen Systems untersucht. Die Kohlebürsten werden bei der Herstellung in verschiedenen Richtungen gepresst. Entsprechend der Pressrichtung orientiert sich das Bürstenmaterial senkrecht dazu. Die in dieser Arbeit untersuchten Bürsten sind in axialer, radialer und tangentialer Richtung gepresst. Bei den axialen und tangentialen Pressungen orientiert sich der Werkstoff senkrecht zur Kontaktfläche. Hingegen richtet sich das Material in den radial gepressten Bürsten parallel zur Kontaktfläche aus.

Die Orientierung des Bürstenwerkstoffs wurde nach dem Pressen durch metallographische Schliffe und REM analysiert. Es wurde festgestellt, dass Graphit und Kupfer eine grobe Vorzugsrichtung in senkrechter Orientierung zur Pressrichtung innerhalb des Bürstenkörpers aufweisen. Nach den Versuchen am Kohlebürstenprüfstand (KBP) und am Dauerlaufprüfstand (DLP) wurde festgestellt, dass sich das Graphit an der Kontaktfläche unabhängig von der Pressrichtung parallel zur Kontaktfläche plastisch deformiert. Die Pressrichtung zeigte dennoch einen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Bürste. Die axial und tangential gepressten Bürsten zeigten infolge der Kupferorientierung einen niedrigen Längswiderstand, sowie einen hohen Querwiderstand. Im Gegensatz dazu war bei der radial gepressten Bürste der Querwiderstand niedriger, als der Längswiderstand. Dieses verursachte eine höhere radiale Bürstentemperatur welche auf Ohm'sche Verluste zurückzuführen ist. Die Versuche mit und ohne Kommutierungsstrom zeigten keinen markanten Verschleißunterschied. Die stromlosen Reibungsversuche hingegen zeigen einen höheren Verschleiß der tangential gepressten Bürste. Es wurde eine Korrelation zwischen den orientierten Bürstenmaterialien und dem Reibungskoeffizienten festgestellt. In der tangentialen Bürste reibt das Graphit mit einer breiten Fläche gegen die Laufrichtung, infolgedessen nimmt die Reibleistung durch die plastische Verformung des Graphits zu. Bei den Versuchen mit Kommutierung wurden die Kommutatorlamellen stärker beansprucht. Der Verschleiß des Systems hat sich aufgrund der Kommutierungsbeanspruchung stärker erhöht. Die Kommutatorlamellen zeigten an den ablaufenden Lamellenkanten eine Verschleißzone, die durch Lichtbögen und Kupferschmelze erzeugt wurden. Der Verschleiß ist in diesem Bereich höher, als an den auflaufenden Kommutatorlamellen. Als Folge kommt es zu einer Kontakttrennung an der ablaufenden Kante, die zusätzliche Lichtbögen hervorruft. Die Lichtbögen verursachen wiederum einen sehr hohen Verschleiß. Für diese Herausforderung wurde ein Lösungsansatz durch die Festigkeitssteigerung des Kupfers gefunden. Die Kommutatoroberfläche wurde mit Wolframcarbid und variierten Strahlungsparametern bestrahlt. Die Festigkeitssteigerung wurde durch einen FIB-Schnitt nach der Hall-Petch-Beziehung beurteilt. Die Dauerlaufversuche am E-Motor mit bestrahlter Kommutatoroberfläche haben gezeigt, dass sich sowohl der Kommutator-, als auch der Bürstenverschleiß durch die Vorbehandlung reduzieren lassen. Des Weiteren wurde der Verschleiß an der ablaufenden Lamellenkante aufgrund der Härte, der hohen Entfestigungstemperatur, sowie der Schmelztemperatur des Wolframcarbids verringert. Die vorherigen Unterschiede zwischen auflaufender und ablaufender Kante der Bürste waren nicht mehr vorhanden.

3 Pressrichtung der Bürsten

Zur Berechnung der maximalen Temperatur im Kontakt wurde ein Modell nach HOLM angewendet. In dieses Modell wurde zunächst die maximale Temperatur anhand eines Ellipsoidmodells für einen ruhenden Kontakt berechnet. Anschließend wurde der Einfluss der Rotation integriert. Die Reibungswärme im Kontakt wurde berechnet. Diese ist von der Größe der mechanischen Kontaktfläche, der Geschwindigkeit, sowie vom Reibungskoeffizienten abhängig. Die zeitabhängige Temperatur, die durch den elektrischen Strom verursacht wird, sowie die Reibungstemperatur wurden zur Berechnung der Endtemperatur im Kontakt berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass die berechnete Kontakttemperatur der radialen Bürste am höchsten ist.

4 Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren

In modernen Kraftfahrzeugen nimmt der Einsatz von Elektromotoren kleiner Leistung stetig zu. Dazu ist immer mehr Raumbedarf erforderlich. Aus diesem Grund ist die Verkleinerung der Baugröße von Elektromotoren im Zuge einer „Downsizing“-Strategie von großer Bedeutung. Diese kann durch die Verschleißreduktion seiner Reibkontakte die Kohlebürsten und den Kupfer-Kommutator erzielen. Ein geeigneter Lösungsansatz dafür könnte die Verwendung geeigneter Schmiermittel sein, deren Einsatz die Stromübertragung nicht behindern soll. In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit der Schmierung von Reibkontakten von bürstenbehafteten Gleichstrommotoren untersucht. Dabei werden sowohl Grundöle als auch additivierte Öle mit hohem und niedrigem spezifischem Widerstand hinsichtlich ihrer tribologischen und elektrischen Eigenschaften untersucht.

4.1 Grundlagen für Schmieröle im elektrischen Kontakt

Schmierstoffe dienen im Allgemeinen zur Verminderung von Reibung und damit des Verschleißes von zwei Reibpartnern. Durch Schmierstoffe bildet sich zwischen den Reibkontakten ein Schmierfilm, der die Oberflächen teilweise oder vollständig trennt [73]. Zum Schmieren der Reibkontakte können Öle mit und ohne Additive sowie Fette verwendet werden.

Der Einfluss der Schmierung auf den elektrischen Kontakten kann sowohl positiv als auch negativ sein, deren Effekte in Abb. 4.1 gegliedert sind. Die positiven Effekte lassen sich unter Verminderung der Reibung und des mechanischen Verschleißes sowie den Schutz der Kontaktfläche gegen Oxidation verstehen. Außerdem vermindern sich die elektrischen Verluste durch Vergrößerung der elektrischen Flächen bei der Verwendung von leitfähigen Schmiermitteln [25]. Andererseits lassen sich die negativen Einwirkungen der Schmieröle in den elektrischen Kontakten durch die Veränderung ihrer Eigenschaften (Viskosität, Feuchtigkeitsgehalt, Verunreinigungen, usw.) infolge der Zersetzung des Öls (Oxidation) [74][S. 241]. Die thermische Beanspruchung trägt zur Bildung von hartem Ölkoks bei [75][S. 130], die zum abrasiven Verschleiß durch Riefung der Oberfläche führen kann [76].

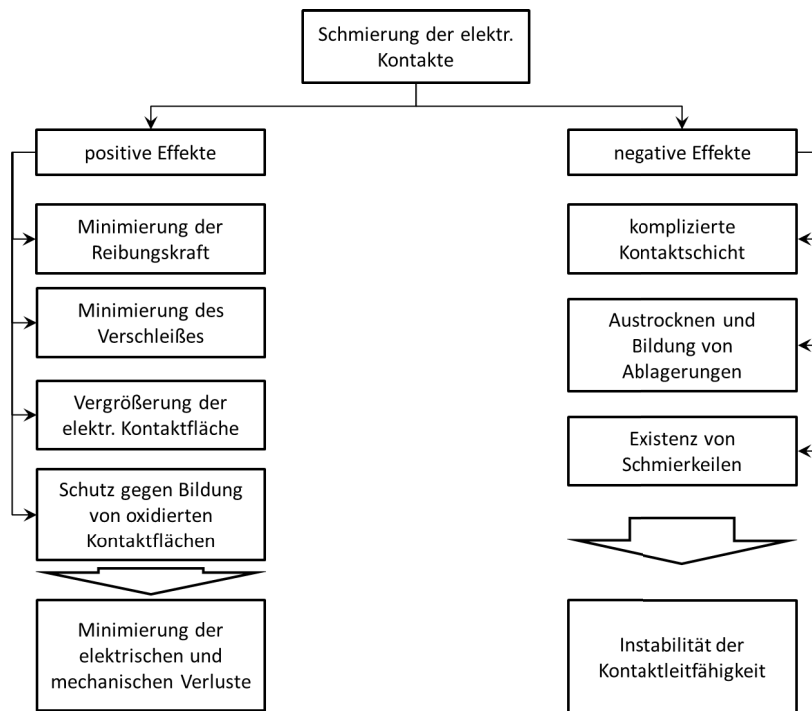


Abbildung 4.1: Mögliche positive und negative Effekte der Schmierung auf den elektrischen Kontakt [25][S. 414].

Die meisten Schmierstoffe weisen einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand im Bereich von $10^5 - 10^{13} \Omega \cdot m$ auf [11][S. 154], sodass die Bildung einer Isolationsschicht zwischen zwei elektrischen Kontakten den Stromfluss verhindern kann. In früheren Untersuchungen wurde der Stromtransport zwischen zwei elektrischen Körpern in Abhängigkeit einer nicht leitenden Zwischenschicht untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Elektronen abhängig von der Schichtdicke von Elektrode A zur Elektrode B die Isolationsschicht durchtunneln können. MANN *et al.* [77] konnten einen Stromfluss während der Existenz einer dünnen Isolationsschicht (ca. 0,1 - 0,3 nm) zwischen zwei elektrischen Elektroden feststellen. MANN UND HIROTA *et al.* [77, 78] konnten beweisen, dass der Tunnelstrom mit ansteigendem Elektrodenabstand exponentiell abnimmt. Die Leitfähigkeit σ des Tunnelstroms von Isolierschichten zwischen Elektroden ist nach Formel 4.1 beschrieben [79]. Je dünner die Isolierschicht und je kleiner die Austrittsarbeit an den Grenzflächen des Elektrode-Isolators desto größer wird der Tunnelstrom [11].

$$\sigma = \frac{e^2}{h} \cdot \sqrt{2m\varphi_{\text{Aus}}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{l}{\hbar}\right) \cdot (\sqrt{2m\varphi_{\text{Aus}}})\right] \quad (4.1)$$

e : Elektron

m : Gewicht eines Elektrons

h : Planck's Konstante

l : Dicke der Isolationsschicht

φ : Austrittsarbeit vom Metall zur Isolationsschicht

Sind die Isolierschichten dicker, als die Einflusszone des Tunneleffekts, kann ein Durch-

schlag stattfinden. Der Durchschlag im flüssigen Isolieröl beruht auf der Hypothese, die auf der Existenz von Gasblasen, Wassermolekülen und ausreichender Feldstärke basiert. Da das Schmieröl hygroskopisch sind, kann es geringe Wassermengen aufnehmen [75][S. 298]. BÖNING [80] behauptete, dass die Ansammlung der Wassertröpfchen im Öl zu Kanälen zwischen den Elektroden führen kann. Durch die Stromwärme verdampfen die Wasserteilchen und bilden dadurch Dampfkanäle, in denen eine Stoßionisation stattfindet und zum Durchschlag führen kann. GÜNTHER-SCHULZE [81] vermutete, dass aufgrund der Ionenbewegung im Öl Reibungswärme entsteht, welche zum Verdampfen der Ölteilchen führt. Dadurch entstehen Gaskanäle, die den Ionisierungsdurchschlag verursachen können. INGE UND WALTER [82] betrachteten die Gasblasen im Öl als Ionisationszentren. Bei ausreichender Feldstärke führt die Ionisation innerhalb der Gasblase zur Erwärmung der benachbarten Ölteilchen. Bei zunehmender Wärme verdampfen die benachbarten Ölteilchen und somit vergrößert sich der Gasblasendurchmesser bis zum Eintreten des Durchschlags. Beim Auftreten von Lichtbögen zersetzt sich das Öl, indem die Ölmoleküle neben der Gasblase zerstört werden und es kann zur weiteren Vergrößerung der Blasen führen. HÄHNEL [82] meinte, dass aufgrund der Ionisation der Gasblasen Ladungsträger entstehen werden. Diese Ladungsträger wandern im Öl und bilden somit eine Trägerlawine, die unter der Wirkung der Feldstärke zur Ionisation des Öls führt. Dabei wird der Wert der Durchschlagsspannung erreicht. Infolge der Ionisation des Isoliergebietes wird der Strom in Form von Lichtbögen eingeleitet.

Der Einsatz von flüssigen Schmierstoffe mit zusätzlicher ionischer Flüssigkeit trägt zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit bei, sowie zum Oberflächenschutz gegen die Oxidation [83]. Ionische Flüssigkeiten sind Salze, deren Schmelzpunkt unter 100 °C liegt [84]. Sie werden auch als „room temperature liquid salts“ bezeichnet, da sie bei Raumtemperatur flüssig sind [85][S. 7]. Ihre chemische Struktur setzt sich aus Kationen und Anionen zusammen. Die chemische Struktur der ionischen Flüssigkeit, die in dieser Arbeit verwendet wurde, ist in Abb. 6.6 dargestellt. Ionische Flüssigkeiten werden für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Im Bereich der Tribologie zeigten sie ihre guten Einsatzmöglichkeiten. In früheren Experimenten wurde gezeigt, dass Schmieröle mit ionischen Flüssigkeiten einen positiven Einfluss haben und sowohl gute tribologische und elektrische Eigenschaften aufweisen [83, 86, 87]. Die Reduzierung des Reibkoeffizienten des geschmierten Gleitsystems bei niedrigen Geschwindigkeiten lässt sich durch die verstärkte Adsorption von hochgeordneten Ionen an der Grenzfläche erklären [88, 89, 87]. Mit zunehmender Geschwindigkeit des Gleitsystems spielt die Orientierung der Ionen an den Grenzschichten eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall dominiert der elektrokinetische Effekt der Ionen [87].

Für gute tribologische und elektrische Eigenschaften des Kommutator-Bürsten-Kontakts eines Elektromotors soll das Schmieröl gute Gleiteigenschaften, sowie eine hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

4.2 Zielsetzung

Die Lebensdauer des bürstenbehafteten permanent erregten Gleichstrommotors wird hauptsächlich durch den Verschleiß seines Tribosystems bestimmt. Zahlreiche Einflussfaktoren beeinträchtigen die tribologischen Eigenschaften der Kohlebürste und des Kommutators. Zu diesen gehört eine dicke Patina, welche die Verschleißraten der Kohlebürsten um eine Größenordnung erhöhen kann. In Abb. 4.2 ist eine Aufnahme eines FIB-Schnitts von einer

Patina, deren Dicke 5 μm überschreitet. Die Bildung solch einer dicken Patina auf der Kommutatoroberfläche ist aufgrund ihrer Härte, sowie ihrer Isolationseigenschaften mit einem extrem Verschleißanstieg der Kohlebürsten. Es kann sogar zum Versagen des Motors führen. Durch die Schmierung der Reibfläche des Elektromotors mit einem geeigneten Schmieröl soll die Reibleistung und die damit verbundene Reibenergie möglichst klein gehalten werden, so dass keine extrem hohen Kontakttemperaturen entstehen, welche das Wachstum der Patina begünstigen können. Außerdem soll das Schmieröl die Oberflächen des Kommutators vor Oxidation schützen.

Der Einsatz einer Schmierung von Reibkontakten im Elektromotor mit synthetischen Grundölen, mit Additiven, sowie mit ionischen Flüssigkeiten wurde bisher noch nicht intensiv erforscht. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Schmierung der Kontaktfläche des Elektromotors mit verschiedenen Ölsorten untersucht und deren Einflüsse auf die tribologischen Eigenschaften.

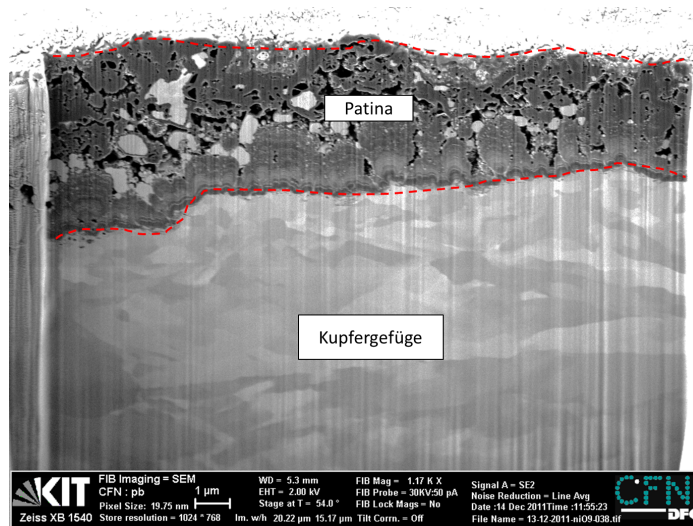


Abbildung 4.2: FIB-Schnitt einer nach 1200 Stunden auf einer Kommutatoroberfläche ausgebildeten Patina [23][S. 44] deren Dicke bis 5 μm beträgt.

Für die geplanten Versuche werden verschiedene Öle untersucht: Grundöle ohne Additive, mit Additiven und Öle mit ionischer Flüssigkeit. Die Anwendung der Grundöle zielt auf den Einfluss der Schmierung auf die tribologischen Eigenschaften des Systems hin. Öle mit Additiven sollen die beteiligten Kontakte vor Oxidation schützen. Das Öl mit ionischer Flüssigkeit soll die Erosion reduzieren. Um den entstandenen Verschleißprozess bei der Schmierung zu verstehen, wurden Öle mit hoher sowie niedriger Leitfähigkeit eingesetzt. Für diesen Zweck werden Triboversuche ohne Kommutierungssystem an dem KBP durchgeführt. Weiterhin sollen Tribosysteme mit niedrigsten, sowie hohen Verschleißwerten in einem realen Motor für einen Dauerlauf von 650 Stunden auf ein reales Verhalten hin untersucht werden. Um die Verschleißmechanismen bei den untersuchten Motoren zu charakterisieren, müssen die Strukturen des Kommutator-Kohlebürste-Systems analysiert und die Verschleißerscheinungsformen untersucht und interpretiert werden. Dafür werden verschiedene analytische Verfahren, wie Röntgen-Photoelektronen- Spektroskopie (engl. X-Ray photoelectron spectroscopy XPS), Energiedispersive Röntgenmikroskopie (engl. energy di-

persive X-ray spectroscopy EDX), fokussierter Ionenstrahl (engl. Focused Ion Beam FIB) und Konfokalmikroskopie verwendet.

4.3 Reibungs- und Verschleißmessungen von geschmierten Kontakten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche vorgestellt. Dazu gehören die Triboversuche am KBP ohne Kommutierungssystem, sowie Triboversuche von kompletten Motoren für einen Dauerlauf von 650 Stunden. Weiter werden die Reibpartner (Kohlebürste und Kommutator) von kompletten Motoren nach dem Dauerlauf auf die Topographie, Mikrostruktur, Gefügestruktur und chemische Zusammensetzung der Randschichten hin untersucht.

4.3.1 Auswahl der Schmieröle

Um die Eignung der Schmieröle im Tribosystem des Elektromotors (Kommutator- Bürste) zu bestimmen, wurden zahlreiche Experimente mit gleichen Versuchsparametern jedoch verschiedenen Ölarten durchgeführt. Die in dieser Arbeit verwendeten Öle sind in Abb. 4.3 dargestellt. Alle Messungen erfolgten bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} , einem Sollstrom von 10 A und einer Federkraft von 3,6 N. Die Versuchsparameter, die in der Tabelle 4.1 dargestellt sind, gelten für Messungen am KBP (Versuche ohne Kommutierungssystem).

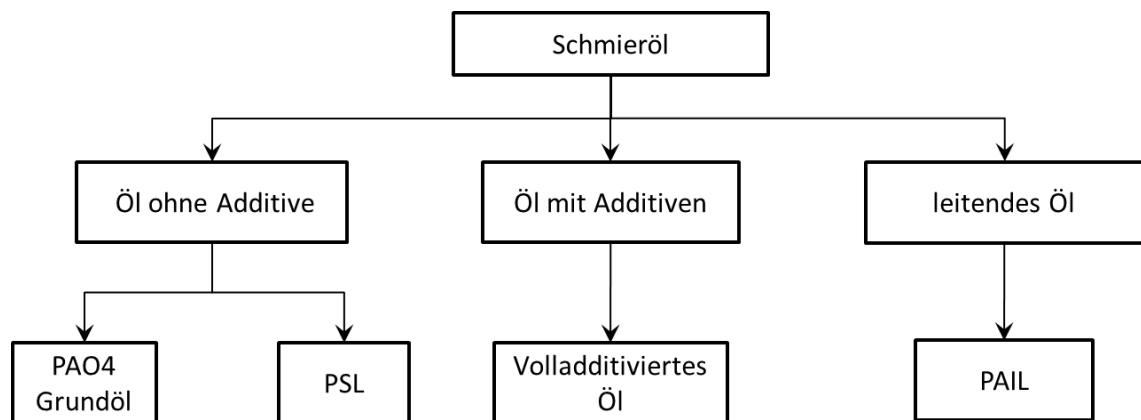


Abbildung 4.3: Eingruppierung der verwendeten Schmieröle. PAO4: Polyalphaolefine, PSL: Polyolester auf Basis synthetisches Öl und PAIL: (Polyalphaolefine with ionic liquid).

Parameter	Wert
Strom I	10 A
Drehzahl n	2000 min^{-1}
Anpresskraft der Bürste F_N	3,6 N
Messzeit	bis 91 h

Tabelle 4.1: Versuchsparameter für Tribosystem mit Schmierölen ohne Kommutierungsstrom.

Die verwendeten Schmieröle sind in drei Gruppen eingeteilt. PAO4 (Polyalphaolefine) und PSL (Polyolester auf Basis synthetisches Öl) sind Schmieröle ohne Additive. Das Grundöl ohne Additivierung PAO4 basiert auf der Polyalphaolefine-Gruppe und wird von der Firma „Fuchs Europe“ geliefert. PAO4 weist bei 100 °C eine kinematische Viskosität von 7,8 mm²/s auf. PSL ist ein Esteröl und weist einen Viskositätsindex nach DIN ISO 3016 von über 160 auf. Als Schmieröl mit Additiven kam das Motorenöl Castrol Edge 5W30 zum Einsatz. Es weist einen Viskositätsindex von 169 auf. Die letzte Ölvariante PAIL (Polyalphaolefine with ionic liquid) ist eine Mischung aus Esteröl und einer 5% ioni- schen Flüssigkeit ([P66614][NTf2]). Diese ionische Flüssigkeit wird als „tri- hexyl(tetradecyl)phosphonium bis{(trifluoromethyl)sulfonyl}amide“ bezeichnet. Die chemische Struktur der ioni- schen Flüssigkeit enthält Fluorid-Anionen und Phosphonium-Kationen und ist in Abb. 6.6 dargestellt. Öl mit ionischer Flüssigkeit zeigt im Gegensatz zu den klassischen Ölen ($> 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$) eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Das PAIL besitzt einen spezifischen Widerstand von ca. $2,8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$. Die Schmierung der Kommutatoren- oberfläche erfolgte für den KBP (ausgenommen der Versuch mit der kontinuierlichen Ölkontamination) und für die Dauerlaufversuche durch einmaliges Beölen vor dem Versuchsstart. Dabei wurde die gleiche Menge Öl von 0,25 ml auf die Probenoberflächen verteilt, sodass die Kommutatoroberfläche vollständig mit einer Ölschicht bedeckt wurde.

4.3.2 Verschleißmessung am KBP ohne Kommutierungsstrom

Die Verschleißmessung der Bürsten erfolgte während des Versuchs durch die Abstand- messung zwischen dem Lasertriangulationssensor und der Bürstenrückseite. Das Ermitteln der Verschleißraten der Bürsten wurde nach dem in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Verfahren durchgeführt.

Die gemessenen Verschleißraten der Bürsten an denen eine positive Spannung anliegt ist, wird in Abb. 4.4 links gezeigt. Man kann erkennen, dass der Bürstenverschleiß von den ver- wendeten Schmierölen abhängig ist. Als Referenz wurden Versuche ohne Schmierung durch- geführt. Die Referenzmessung zeigt eine Verschleißrate von 0,3 µm/h. Es ist zu beobachten, dass nur das leitfähige Öl (PAIL) eine ähnlich hohe Verschleißrate, wie die Referenzmes- sung aufweist. Die Schmieröle mit und ohne Additive zeigen erhöhte Verschleißwerte von mindestens dem Fünffachen und diese variieren zwischen 1,63 und 2,92 µm/h.

4.3 Reibungs- und Verschleißmessungen von geschmierten Kontakten

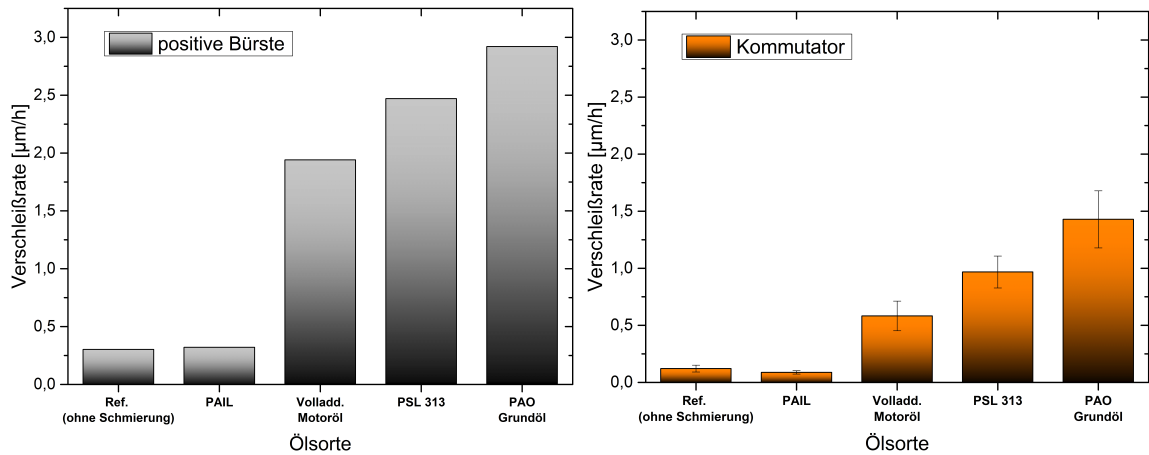


Abbildung 4.4: Links: Verschleißrate der positiven Bürsten in Abhängigkeit der Ölsorte. Rechts: Verschleißrate der Kommutatoren in Abhängigkeit der Ölsorte.

In Abb. 4.4 rechts sind die gemittelten Verschleißraten des Kommutatorverschleißes dargestellt. Aufgrund des gleichmäßigen Verschleißes der Lamellen wurde der Verschleiß von drei Kommutatorlamellen nach dem in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Verfahren gemessen. Die niedrigste Verschleißrate weist den mit leitfähigem Öl (PAIL) gelaufenen Kommutator auf. Diese liegt bei $0,09 \pm 0,015 \mu\text{m/h}$ und ist um 75% niedriger, als der Wert der Referenzmessung. Die Verschleißraten für die nichtleitenden Schmieröle mit Additiven und ohne Additive weisen hohe Werte auf und variieren zwischen 0,58 und $1,43 \mu\text{m/h}$.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass alle Versuche, die mit schlecht leitenden Ölen (sowohl mit Additiven, als auch ohne Additive) stattfinden, hohe Verschleißwerte im Vergleich zur Referenz und zum leitenden Schmieröl PAIL aufweisen.

4.3.2.1 Einfluss des Schmieröls auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Tribosystems

Für weitere Versuche wurden aus verschiedenen Ölvarianten ein schlecht leitendes Öl (PSL) und ein gut leitendes Öl (PAIL) ausgewählt. Ziel ist es, die Mechanismen, den durch das schlecht leitende Öl verursachten hohen Kommutatorverschleiß zu verstehen. Abb. 4.5 zeigt das Verhalten der Reibungskoeffizienten und der Widerstände der Versuche mit dem schlecht leitenden Öl (PSL) und mit dem elektrisch gut leitenden Öl (PAIL) für 20 Stunden an. Der Kontaktwiderstand ist (Formel 4.2) das Verhältnis der Summe des Bürstenspannungsabfalls beider Bürsten zum gemessenen Strom.

$$R_K = \frac{U_{PB} + U_{MB}}{I} \quad (4.2)$$

Der Reibungskoeffizient des Versuchs mit PAIL-Öl zeigt bei allen Versuchen einen Anstieg in der Einlaufphase (innerhalb der ersten 90 Minuten, Abb. 4.5). Nach der Einlaufphase (> 2 Stunden) erreicht der Reibungskoeffizient einen stabilen Zustand und nimmt bis Versuchsende einen konstanten Wert an. Der Versuch mit PSL zeigt dagegen ein instabiles Verhalten während der ersten 4 Stunden, sodass der Reibungskoeffizient zwischen 0,3 und 0,54 schwankt. Die Einlaufphase ist nach ca. 12 Stunden beendet.

Abb. 4.5 rechts zeigt den nach Formel 4.2 berechneten Widerstand an. Analog zum Reibungskoeffizienten des Versuchs mit PAIL steigt der Widerstand für die ersten 90 Minuten an und fällt danach leicht ab. Nach 2 Stunden ist eine Zunahme des Widerstands zu beobachten. Die Werte des Widerstands vom Versuch mit PSL liegen in der Einlaufphase um 30% höher und weisen in den ersten 6 Stunden eine große Schwankung zwischen 70 und 90 m Ω auf. Das Maximum wurde nach 6 Stunden Laufzeit erreicht. Danach fällt den Wert auf 75 m Ω ab.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass PSL einen negativen Einfluss auf den Einlauf des Systems hat. Hohe, sowie schwankende Widerstandswerte sind ebenso zu beobachten. Im Gegensatz dazu läuft das Tribosystem mit PAIL-Öl schneller ein und zeigt einen stabilen Verlauf nach der Einlaufphase. Ein Anstieg des Widerstands ist nach der Einlaufphase zu beobachten.

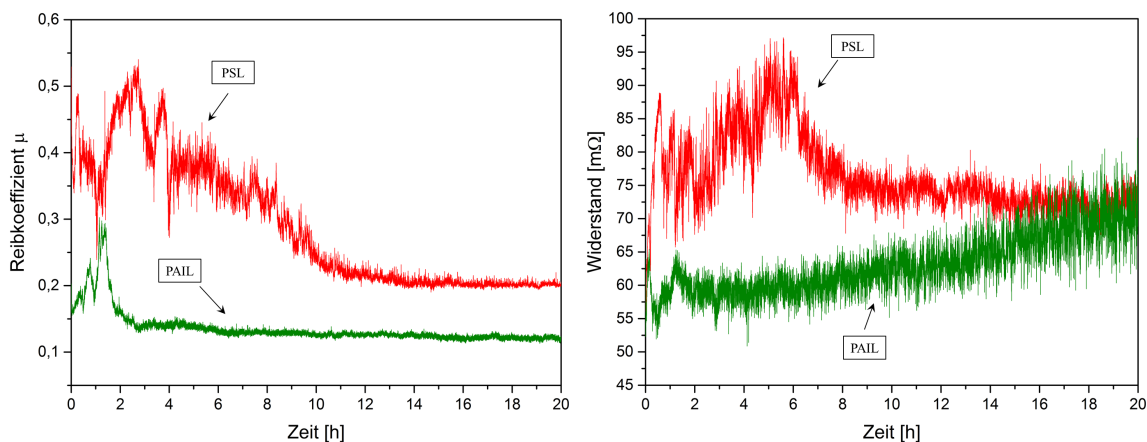


Abbildung 4.5: Verlauf des Reibungskoeffizienten (links) und des Widerstands (rechts) der KBP-Versuche mit PSL und PAIL ohne Kommutierungssystem. PSL-Versuch (rot), PAIL-Versuch (grün).

4.3.2.2 Einfluss des Öls auf den Reibungskoeffizienten und den Verschleiß beim stromlosen Triboversuch

Um den Einfluss des Schmiermittels PSL auf den mechanischen Verschleiß des Tribosystems zu untersuchen, wurden stromlose Triboversuche am KBP durchgeführt. Die Versuchsparameter sind aus der Tabelle 4.1 ($I = 0$ A) zu entnehmen. Abb. 4.6 links zeigt den Vergleich zwischen dem Verlauf der Reibungskoeffizienten des trockenen Versuchs, des Versuchs mit PSL-Öl bei 10 A und des Versuchs mit PSL-Öl ohne Strom. Die Reibungskoeffizienten der verschiedenen Versuche zeigen unterschiedliches Verhalten in ihrem Einlaufbereich. Beim stromlosen Versuch mit PSL-Öl (blaue Kurve) ist eine exponentielle Abnahme des Reibkoeffizienten in den ersten 4 Stunden zu erkennen. Dabei zeigt der Versuch mit PSL-Öl bei $I = 10$ A eine Einlaufdauer von ca. 10 Stunden, dessen Reibungsverlauf eine große Schwankung in den ersten vier Stunden aufweist.

Die Verschleißraten der positiven Bürste, sowie des Kommutators sind in Abb. 4.6 rechts dargestellt. Es ist aus dem Diagramm ersichtlich, dass die Verschleißraten für den Versuch mit PSL bei $I = 0$ A den Werten im Referenzversuch ähneln. Im Gegensatz steigt der Verschleißwert bei PSL ($I = 10$ A) um den Faktor 8 an.

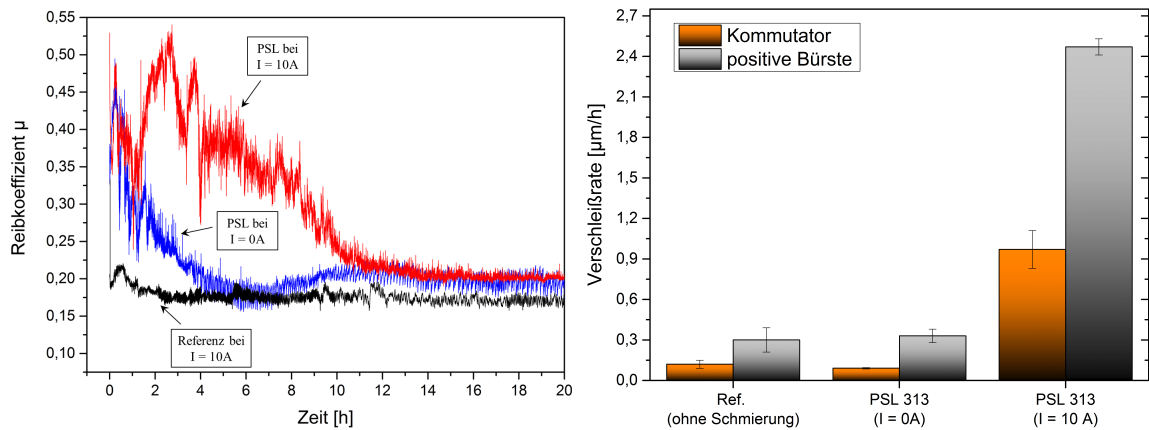


Abbildung 4.6: links: Reibkoeffizient eines Tribosystems ohne Schmierung bei $I = 10\text{ A}$ (schwarz), mit PSL-Schmierung bei $I = 0\text{ A}$ (blau) und bei $I = 10\text{ A}$ (rot). Rechts: entsprechende Verschleißraten der positiven Bürste und des Kommutators.

4.3.2.3 Der Einfluss der kontinuierlichen Ölkontamination auf das Tribosystem

In Abb. 4.5 wurde gezeigt, dass das schlecht leitende PSL-Öl einen Einfluss auf den Reibkoeffizienten und somit auf den Widerstand in seiner Einwirkungsphase (bis 5 Stunden) hat. Es wurden weitere Versuche (bis zu 15 Stunden) mit einer kontinuierlichen Beölung durchgeführt. Die Kontaktfläche wurde jede Stunde mit 0,25 ml Öl benetzt und gleichzeitig der Strom um ein Ampere erhöht. Die Mittelwerte der Reibkoeffizienten der Referenzmessung (ohne Öl), einmal mit einmaliger PSL Beölung und dann mit kontinuierlicher Beölung, sind in Abb. 4.7 dargestellt. Der Reibungskoeffizient der Referenzmessung (schwarz) zeigt eine leichte Abnahme mit steigendem Strom, beziehungsweise mit zunehmender Zeit. Ein doppelt so hoher Reibwert mit großem Fehlerbalken ist bei dem Versuch mit einmaliger Ölkontamination (rot) beim Versuchsbeginn messbar. Mit steigendem Stromwert nimmt der Reibwert ab und erreicht nach 7 Stunden die Werte der Referenzmessung. Nach 7 Stunden fällt der gemittelte Reibwert ab und ähnelt dem Wert der Referenzmessung. Für den Versuch mit kontinuierlicher Beölung weicht der gemittelte Reibwert (grün) von dem der Referenzmessung stark ab. Für die gesamte Versuchszeit zeigt der Reibungskoeffizient hohe Werte und diese schwanken zwischen 0,4 und 0,45.

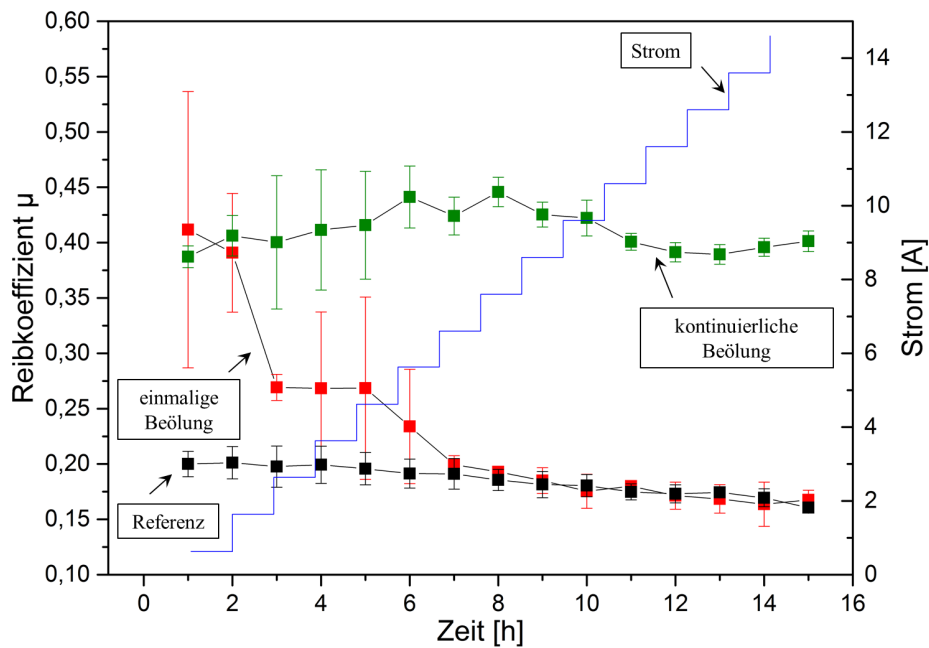


Abbildung 4.7: Vergleich des Reibungskoeffizienten zwischen trockenem Versuch (schwarz), einmaliger (rot) und kontinuierlicher Ölkontamination (grün).

4.3.2.4 Zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung beim Schmieren mit PSL-Öl

Im Bild 4.8 ist ein Lichtbogen zwischen der positiven Kohlebürste und dem Kommutator optisch sichtbar. Der Kommutator wurde mit entfernten Ankerwicklungen bei 2000 min^{-1} am KBP gedreht. Der Strom betrug 10 A. Eine PSL-Ölschicht befand sich zwischen den Kontakten.

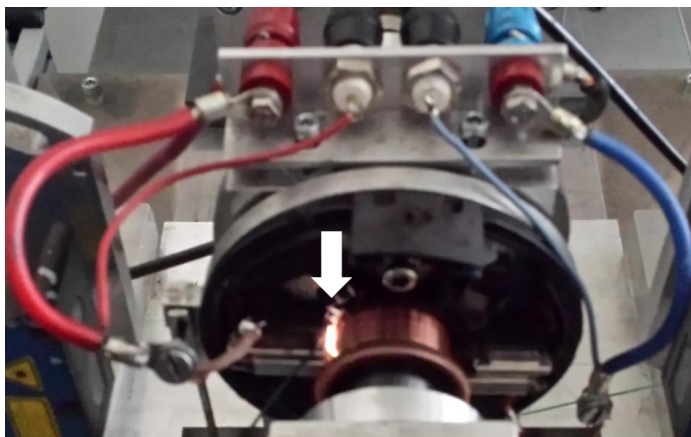


Abbildung 4.8: Eine Lichtbogenerkennung am KBP zwischen der positiven Kohlebürste und dem Kommutator bei $I = 10 \text{ A}$ und $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

Abb. 4.9 zeigt einen zeitlichen Verlauf von Spannung u_B und Strom i_B des Versuchs. Aus der u - i -Kennlinie sind zwei unterschiedliche Verhalten in den gekennzeichneten Bereichen 1

und 2 festzustellen. Im Bereich 1 steigt die Spannung (rote Kurve) ab $t = 0,5 \text{ ms}$ von 1 V auf 5 V steil an. Gleichzeitig fällt der Strom (schwarze Kurve) von 11 A auf 5 A steil ab und steigt wieder auf 10 A . Im Bereich 2 steigt die Spannung u_B auf 14 V an, einhergehend nimmt der Strom i_B auf ca. 0 A ab. Der Strom weist hier seinen niedrigsten Wert für eine Dauer von 1 ms auf. Anschließend steigt der Strom steil an und erreicht einen Wert von 45 A bei $0,93 \text{ ms}$. Währenddessen fällt die Lichtbogenspannung u_B rasch auf $1,5 \text{ V}$ ab. Im Bereich 1 kann kein Lichtbogen auftreten, da die Mindestspannung des Lichtbogen, welche zwischen 12 V und 14 V liegt, nicht erreicht wurde. Die Mindestspannung ist von beteiligten Werkstoffen abhängig und liegt beim Kupfer zwischen 12 V und 14 V [11][S. 46]. Aufgrund der Isolationsschicht (Öl) erhöht sich die Spannung stetig bis ihr Endwert von 14 V erreicht wird. Anschließend bricht die Spannung auf 2 V zusammen und kommt es zum Durchschlagen zwischen der Kohlebürste und dem Kommutator.

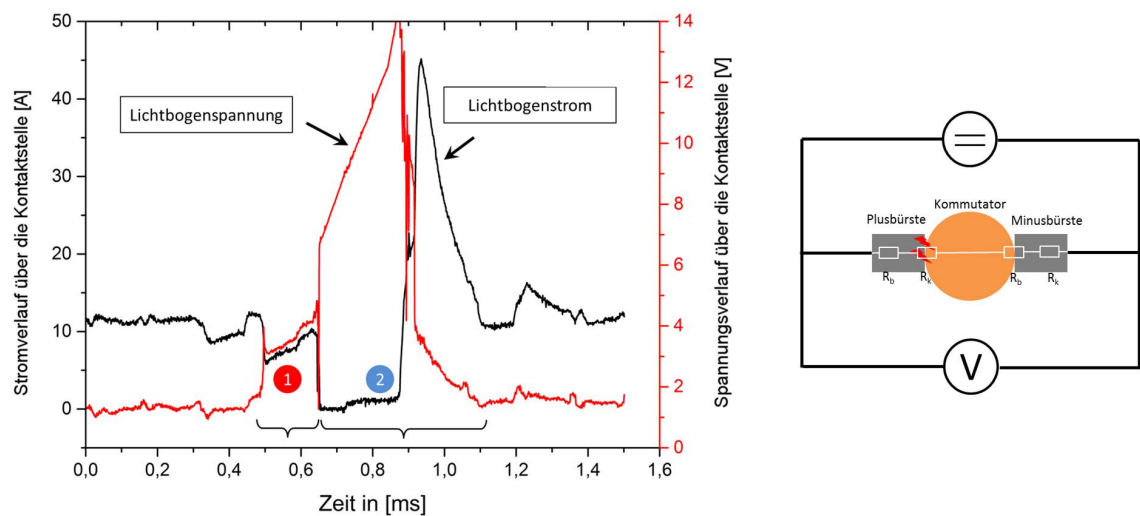


Abbildung 4.9: Rechts: Strom- und Spannungsverlauf eines Lichtbogens zwischen einer Kohlebürste und einem Kupferkommutator bei $I = 10 \text{ A}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und bei der Existenz von PSL-Öl zwischen den Kontakten.

4.3.3 Verschleißmessung mit Kommutierungsstrom

Aufgrund der Erkenntnisse aus den KBP-Versuchen (Abschnitt 4.3.2) bezüglich des Einflusses der nichtleitenden Öle auf den Verschleiß der Bürste und des Kommutators, wurden Dauerlaufversuche nur mit PAIL Öl und PSL durchgeführt. Die Schmieröle wurden in kompletten E-Motoren am Dauerlaufprüfstand für eine Laufzeit von 650 Stunden untersucht, um den Einfluss der Schmieröle auf das tribologische System des E-Motors mit Ankerspulen und unter dem Einfluss der Magnetfelder zu bestimmen. Ein Lüfterrad wurde zur Erzeugung einer Motorenlast verwendet (siehe Abb. 2.22). Das Lüfterrad ist an einer Welle befestigt und diese ist mit den Motorenwellen über eine Kupplung verbunden. Die Parameter der Versuche sind in Tabelle 4.2 gezeigt.

4 Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren

Spannung	Drehzahl n	Strom	Bürstenkraft	Messzeit
12 V	2000 min ⁻¹	7,8 A	3,6 N	650 h

Tabelle 4.2: Versuchsparameter der Dauerlaufmessungen.

Abb. 4.10 zeigt die Verschleißwerte des Kommutators nach 650 Stunden Dauerlauf. Es ist zu bemerken, dass der Kommutatorverschleiß des PSL-Versuchs um den Faktor 3 höher als der Kommutatorverschleiß der Referenzmessung ist. Dagegen zeigt der Kommutatorverschleiß des PAIL-Versuchs einen ähnlichen Verschleißwert zur, verglichen mit der Referenzmessung.

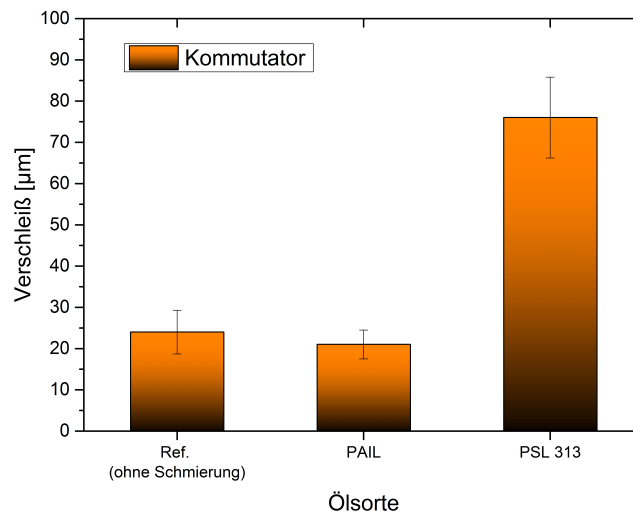


Abbildung 4.10: Gemittelte Verschleißwerte von Bürsten und Kommutatoren der Dauerlaufmotoren.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass das elektrisch leitende Öl (PAIL) zum schnelleren Einlauf des Tribosystems mit niedrigen stabilen Reibwerten führt. Im Gegensatz dazu zeigten die Versuche mit schlecht leitendem Öl eine längere Einlaufzeit sowie hohe Reibwerte. Zusätzlich traten bei schlecht leitendem Öl Lichtbögen zwischen den Kontakten auf. Im folgenden Abschnitt werden die untersuchten Reibkontakte mit verschiedenen analytischen Verfahren untersucht werden, um die im Kontakt auftretenden Verschleißmechanismen zu charakterisieren.

4.4 Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte

Die eingesetzten Analyseverfahren dienen dazu, das Gefüge und die Oberfläche der Proben zu untersuchen. Mit dem Lichtmikroskop, Konfokalmikroskop und Rasterelektronenmikroskop (REM) wurde die Probenoberfläche auf Struktur und Morphologie nach einem Dauerlauf von 650 Stunden untersucht. Die Gefügestruktur der Oberflächen lässt sich mit der Mikroskopie durch fokussierte Ionenstrahlen analysieren. Um eine Aussage über die chemische Zusammensetzung und Dicke der Patina machen zu können, wurde die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) verwendet.

4.4.1 Topographie

In Abb. 4.11 sind die Lichtmikroskopieaufnahmen der Kommutatoroberflächen vom Referenzmotor (trockener Versuch), dem Motor mit PAIL (leitfähiges Öl) und dem Motor mit PSL (schlecht leitendes Öl) dargestellt. Alle Kommutatoren zeigen über alle Lamellen Verschleißspuren. Auf dem Kommutator (Abb. 4.11 c), der mit schlecht leitendem Öl (PSL) gelaufen ist, sind einerseits tiefe Reibspuren, andererseits Verschleißreste zwischen den Lamellen zu erkennen. Diese Reste sind Agglomerate aus Verschleißpartikeln der Bürsten und des Kommutators und Öl, sowie gegebenenfalls Staub- oder Schmutzpartikel. Abb. 4.11 b zeigt die Struktur der Lamellenoberflächen des Versuchs mit PAIL-Öl. Der Raum zwischen den Lamellen weist keine agglomerierten Verschleißpartikel auf.

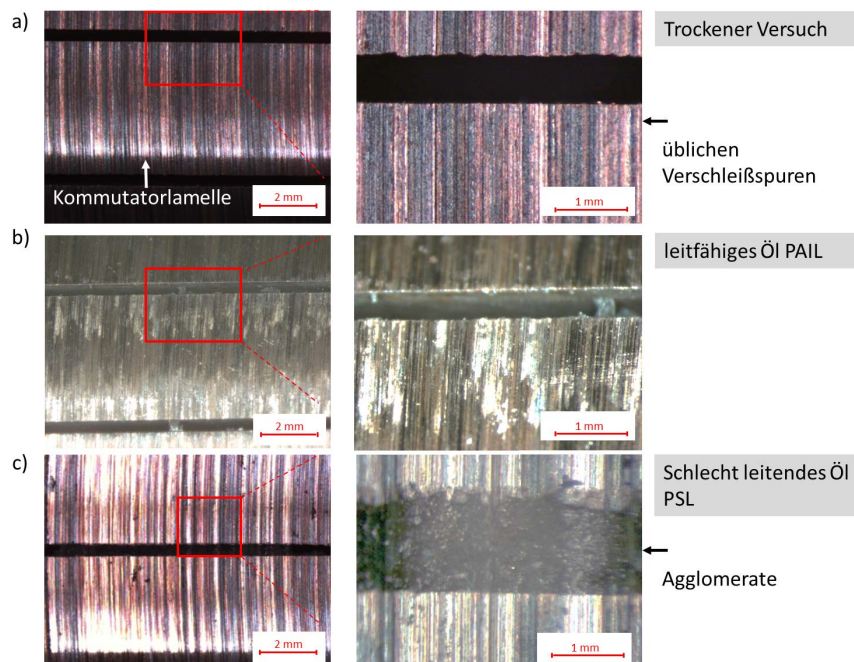


Abbildung 4.11: Lichtmikroskopieaufnahmen von Lamellenoberflächen nach 650h Dauerbetrieb: a) Referenzmotor, b) Motor mit PAIL und c) Motor mit PSL.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der topographischen Analyse mit dem Konfokalmikroskop für die Kommutatoroberflächen vorgestellt. Für die Auswertung der Rauheiten

wurde ein Rauheitsfilter gemäß DIN EN ISO 4288 verwendet. In Abb. 4.12 ist jeweils ein 3D-Bild von der Lamelle des Referenzmotors (ohne Öl), der Lamelle des Motors mit Schmieröl PAIL (leitfähiges Öl), sowie der Lamellen des Motors mit Schmieröl PSL dargestellt. Es wurden für jede Kommutatorlamelle drei Aufnahmen (auflaufende-, ablaufende Kante und Lamellenmitte) erstellt. Eine Aufnahme beinhaltet eine Reibfläche (Mitte einer Aufnahme), sowie eine nicht gelaufene Fläche (links und rechts einer Aufnahme). Die nicht gelaufene Fläche lässt sich anhand ihrer Struktur zu erkennen. Die Ausrichtung des Profilschnitts erfolgte senkrecht zur Reibfläche (siehe Abb. 4.12). Für die Auswertung der Rauheitswerte, sowie des Verschleißes der gelaufenen Kommutatoren wurde jeweils der arithmetischen Mittenrauwert R_a von mindestens drei Aufnahmen betrachtet. Um den Vergleich zu vereinfachen, wurden alle unten dargestellten Profile mit der gleichen Farbskala dargestellt. Auf allen Konfokalaufnahmen (siehe Abb. 4.12) sind Riefen erkennbar, die durch Kupfer-Kupfer-Reibung oder wahrscheinlich durch Verschleißpartikel, die zwischen Kommutator und Bürste aus dem Umgebungsmedium hinein gelangt sind, verursacht wurden. Es lassen sich bei den Aufnahmen zwei Unterschiede feststellen: zum Einen weist der Versuch mit PSL-Öl den größten Höhenunterschied zwischen der gelaufenen und nicht gelaufenen Flächen auf, zum anderen ist ein wellenartiges Verschleißprofil zu sehen.

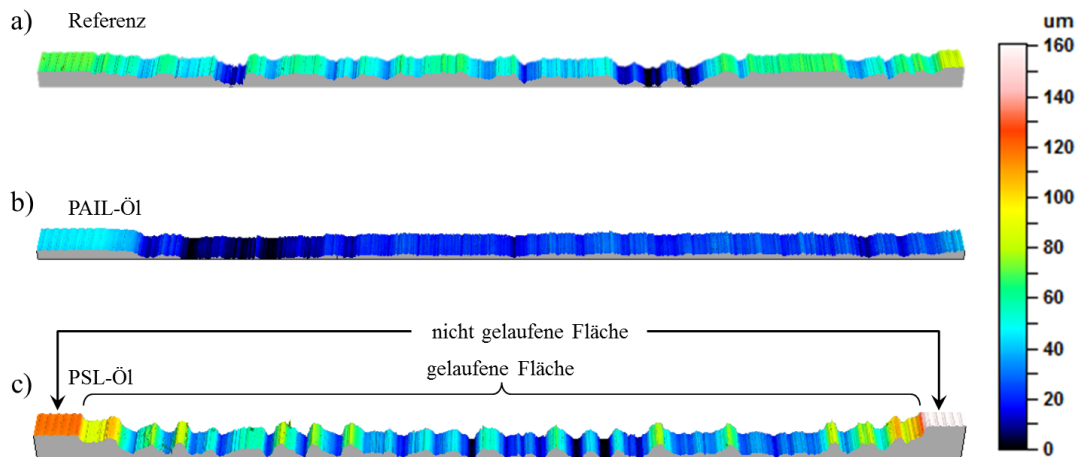


Abbildung 4.12: 3D-Konfokalaufnahmen der Lamellen nach 650h Dauerbetrieb mit 20-facher Vergrößerung vom a) Referenzversuch, b) Versuch mit PAIL und c) Versuch mit PSL.

In Abb. 4.13 sind die Rauheitsprofile der Reibflächen von den gelaufenen Kommutatoren dargestellt. Zu jedem Rauheitsprofil ist ein 2D-Konfokalbild mit entsprechender Farbskala angeordnet. Eine gestrichelte Linie ist innerhalb der Reibfläche gelegt und entspricht dem Profil senkrecht zur Lauffläche. Die Mittelwerte der Rauheiten von der Kommutator- und Bürstenoberfläche sind in Abb. 4.14 gezeigt. Es lässt sich erkennen, dass die Bürste und der Kommutator des Versuchs mit PSL raue Oberflächen im Vergleich zur Referenzmessung aufweisen. Jedoch liegt der Mittelwert der Kommutator- und Bürstenrauheit vom Versuch

4.4 Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte

mit PAIL-Öl unter dem Wert der Referenzmessung.

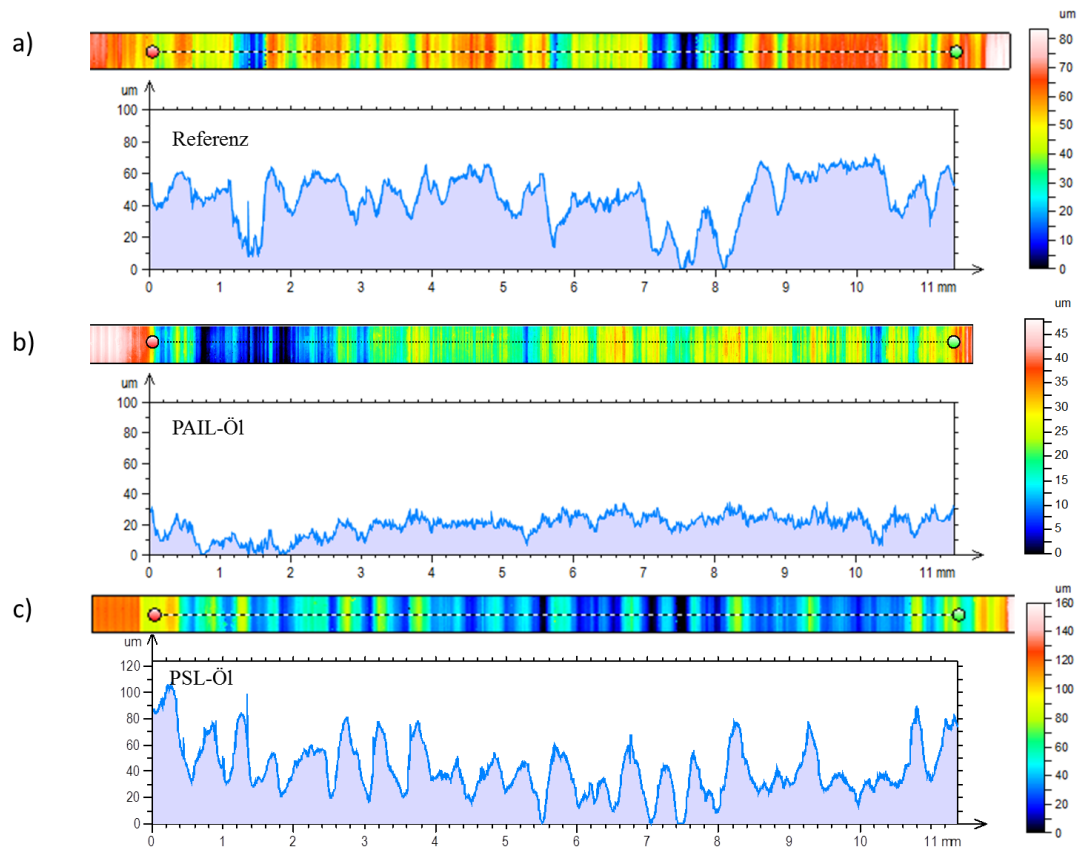


Abbildung 4.13: Rauheitsprofil der Reibflächen des Kommutators nach 650h Dauerbetrieb vom a) Referenzversuch, b) Versuch mit PAIL und c) Versuch mit PSL.

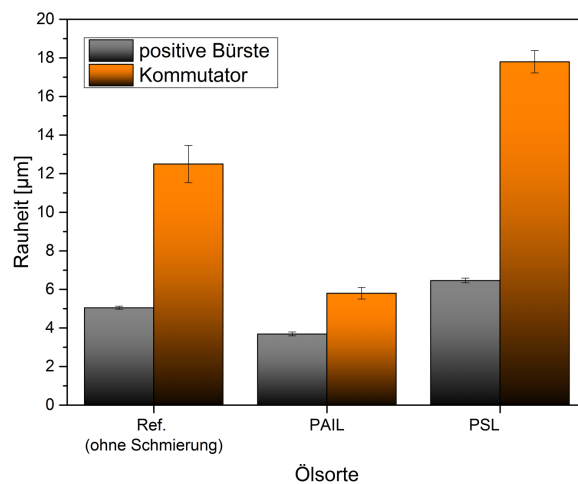


Abbildung 4.14: Mittelwerte der Rauheiten der positiven Bürsten und des Kommutators nach 650 h Dauerlauf.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass das schlecht leitende Schmieröl PSL einen hohen Kommutatorverschleiß und sehr raue Oberflächen des Tribopartners verursacht hat. Der Versuch mit PAIL Öl zeigte niedrige Verschleiß- und Rauheitswerte auf.

4.4.2 Mikrostrukturanalyse

4.4.2.1 Trockener Versuch (Referenz)

Oberflächenmorphologie

Abb. 4.15 zeigt REM-Aufnahmen der Lamellenreibfläche des Referenzmotors (trockener Versuch). Um den Kontrast der Oberflächenmorphologie der Lamellen zu erhöhen, wurden die REM-Aufnahmen mit einem Sekundärelektronen-Detektor und bei niedriger Beschleunigungsspannung gemessen.

In der Laufläche des Kommutators sind Riefen zu sehen. Diese Riefen können abrasiv bedingt sein. Beim abrasiven Verschleiß dringen die Kontaktspitzen der Kohlebürste (mit Kupferzusätze) in die Kommutatoroberfläche ein und pflügen bei Drehbewegung des Kommutators durch die Oberfläche. Stelle 1 in Abb. 4.15 a zeigt Riefen entlang der Laufrichtung. Im Vergleich zur Stelle 1 zeigt Stelle 2 scharf begrenzte Flächen, die durch Einbettung von zahlreichen Fremdpartikeln entlang der Reibspur zustande kommen können. In mehreren Spuren (Stelle 3) ist Fremdmaterial zu erkennen. Der Materialübertrag kommt in schuppenartiger oder in großflächiger Form (vor Abb. 4.15 c). Da Graphit weicher als Kupfer ist, wird das übertragene Graphit zerkleinert, durch Gleitbewegung aus der Reibfläche entfernt oder in der Oberfläche des Kommutators eingedrückt.

Gefügestruktur

Für die Gefügeanalyse der Kupferlamellen nach den Dauerlaufversuchen wurden einzelne Lamellen aus dem Kommutator entfernt und im Ultraschallbad mit Isopropanol gereinigt. Aufgrund des Reinigungsprozesses der Lamellenoberflächen kann keine Aussage über die Ausbildung, beziehungsweise die Dicke der Patina getroffen werden, da diese im Ultraschallbad möglicherweise entfernt wurde. Um eine Patinadicke zu bestimmen, wird die Kommutatorlamelle mit XPS analysiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.18 dargestellt.

In Abb. 4.16 ist ein freigelegter FIB-Schnitt in einer ungelaufenen Lamelle dargestellt. Das ursprüngliche Kupfergefüge ist unter einer Platinschutzschicht zu erkennen. Abb. 4.17 zeigt einen ca. 16 µm breiten Schnitt senkrecht zur Laufläche der Lamelle nach dem trockenen Versuch. Hier ist die Entwicklung der Randzone entsprechend ihrer Mikrostruktur nach der elektrischen und mechanischen Beanspruchung zu beobachten. Das Bild 4.17 zeigt eine deutliche Kornverfeinerung im oberflächennahen Bereich. Ihre gemessene Tiefe liegt bei ca. 4 µm. Die unter diesem Bereich liegende Mikrostruktur (Bereich 4) entspricht der Mikrostruktur des Grundgefüges. Unmittelbar auf der Oberfläche (Bereich 1) hat sich eine parabelförmige, strukturlose Patina ausgebildet. Unter- und innerhalb der Patinaschicht im Bereich 3 sind Defekte in den Körnern erkennbar.

4.4 Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte

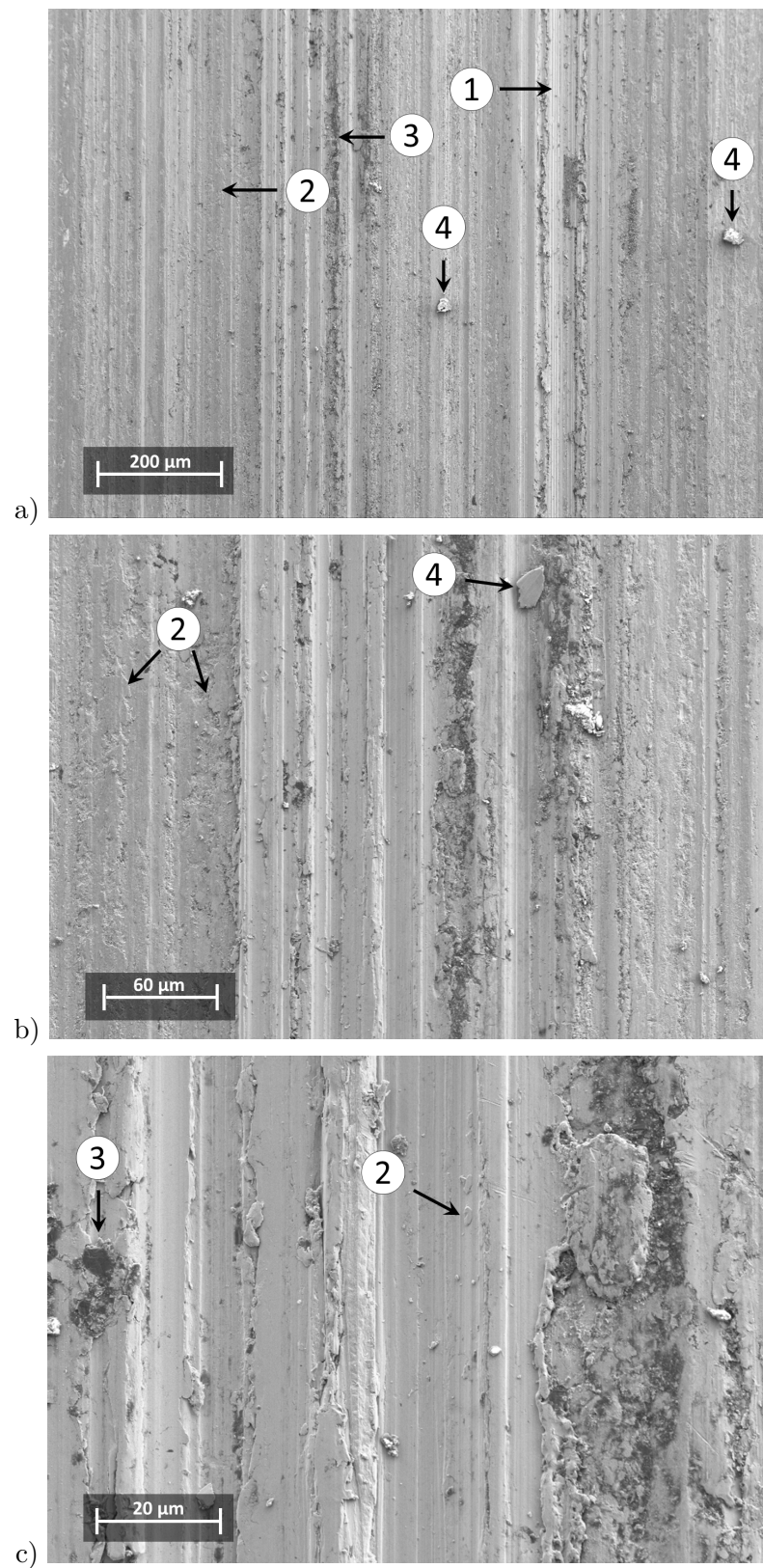


Abbildung 4.15: REM-Aufnahme der Kommutatoroberfläche des Referenzmotors nach 650h Dauerbetrieb. 1: abrasive Riefen, 2: eingebettete Verschleißpartikel, 3: Fremdmaterial, 4: Verschleißpartikel. Bild b) und Bild c) zeigen die Vergrößerungen des Bilds a).

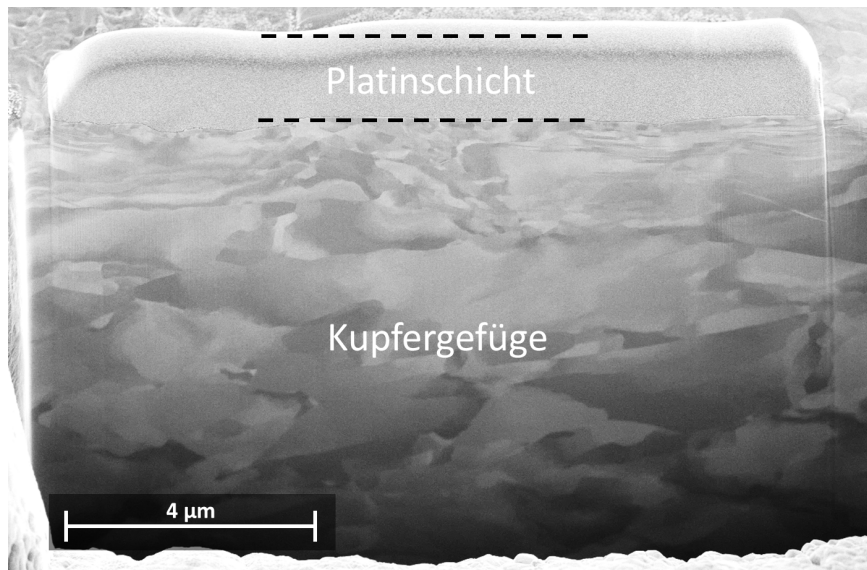


Abbildung 4.16: Gefügestruktur der Kupferlamelle im neuen Zustand.

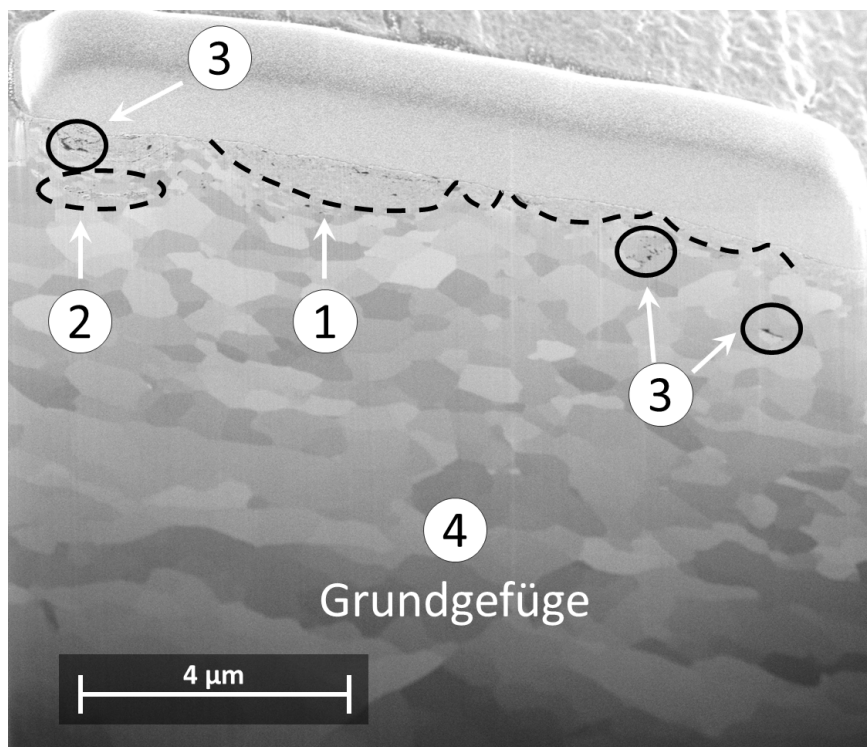


Abbildung 4.17: Gefügestruktur der Kupferlamelle des Referenzmotors nach 650h Dauerbetrieb. 1: Patina, 2: Fremdmaterial, 3: Defekte, 4: Grundgefüge des Kupfers.

Chemische Analyse

Die in Abb. 4.18 gezeigten XPS-Tiefenprofile wurden entsprechend dem im Abschnitt 2.4.3.3 beschriebenen Verfahren gemessen. In Abb. 4.18 links ist ein XPS Tiefenprofil für eine Kommutatorlamelle des trockenen Versuchs abgebildet. Die gesamte Abtragstiefe beträgt $3\text{ }\mu\text{m}$. Das nebenstehende Bild zeigt eine Vergrößerung des Tiefenprofils bis zu $1\text{ }\mu\text{m}$, damit die Details des Signalverlaufs der einzelnen chemischen Elemente sichtbar werden. Eine möglichst große Tiefe dient zur Abschätzung, beziehungsweise Aussage über die Dicke der Patina. Für alle folgenden Tiefenprofile wird die Aussage über die Patinadicke bei einem Kupferanteil von 95 At.-% getroffen. In Abb. 4.18 links beträgt die Patinadicke mindestens $1,5\text{ }\mu\text{m}$. Diese Patina setzt sich aus Cu, C, O, S und N. Unmittelbar auf der Oberfläche liegt der Cu-Gehalt bei 60 At.-%, der C-Gehalt bei 30 At.-%, der O-Gehalt bei 9 At.-%, der S- und N-Gehalt unter 1 At.-%. Innerhalb der ersten $25\text{ }\mu\text{m}$ fällt der C-Gehalt auf 5 At.-% ab. Danach zeigt sich eine leichte Abnahme und erreicht 0 At.-% bei $1,5\text{ }\mu\text{m}$. Analog dazu verläuft das O-Signal und erreicht das Minimum bei einer Tiefe von $1,5\text{ }\mu\text{m}$. Ab $1,5\text{ }\mu\text{m}$ gibt es eine deutliche Kupferanreicherung und somit erreicht die Probe ihr Matrixniveau.

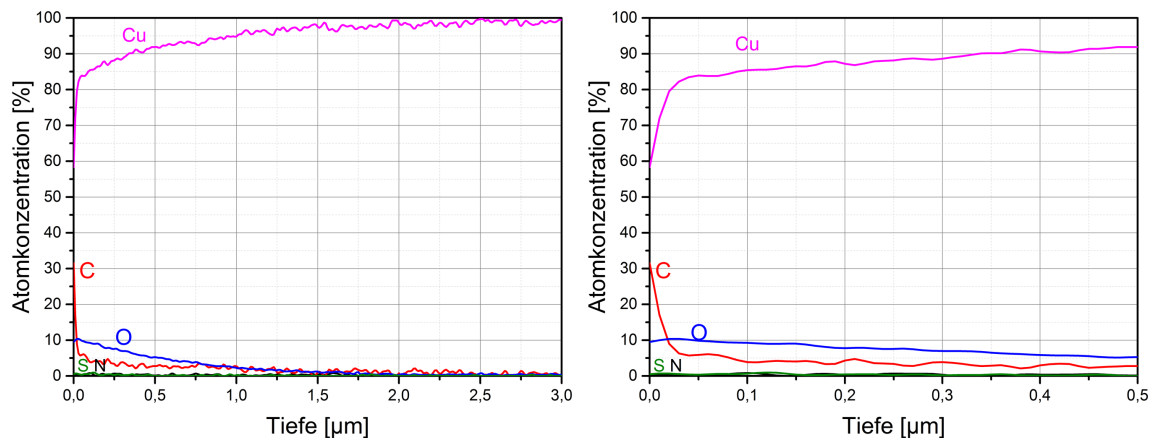


Abbildung 4.18: XPS-Tiefenprofil der Lamellenoberfläche des Referenzmotors nach 650 h Dauerbetrieb. Links: gesamter Messbereich mit einer Abtragstiefe von $3\text{ }\mu\text{m}$. Rechts: Ausschnitt mit einer Abtragstiefe von $1\text{ }\mu\text{m}$ von der Oberfläche.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass aufgrund der mechanischen und elektrischen Beanspruchung der Reibpartner Verschleißspuren, sowie -partikel im Kontaktbereich entstanden sind. Die gesamte Tiefeneinwirkung (Kornverfeinerung) betrug ca. $4\text{ }\mu\text{m}$. Die chemische Analyse des Kommutators lieferte quantitative Aussagen über die Zusammensetzung der Patina. Sie setzt sich aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Kupferoxiden, Schwefel und Stickstoff zusammen. Die Abschätzung ihrer Dicke liegt bei ca. $1,5\text{ }\mu\text{m}$.

4.4.2.2 Triboversuch mit PAIL

Oberflächenmorphologie

Abb. 4.19 zeigt die Laufläche des Kommutators. Auf der Oberfläche sind Riefen in Laufrichtung, sowie der Materialabtrag zu sehen. In Abb. 4.19 b sind im Bereich der ablaufenden Kante Überlagerungen von zahlreichen Schmelzkratern zu beobachten, die die Riefen teilweise bedecken. Bei einer weiteren Vergrößerung dieses Bereiches (Abb. 4.19 c) ist eine

4 Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren

optische Erkennung, dass die geschmolzenen Kupfer in rundlich glatter Form erstarrt sind. Außerdem ist eine geglättete Reibspur zu erkennen.

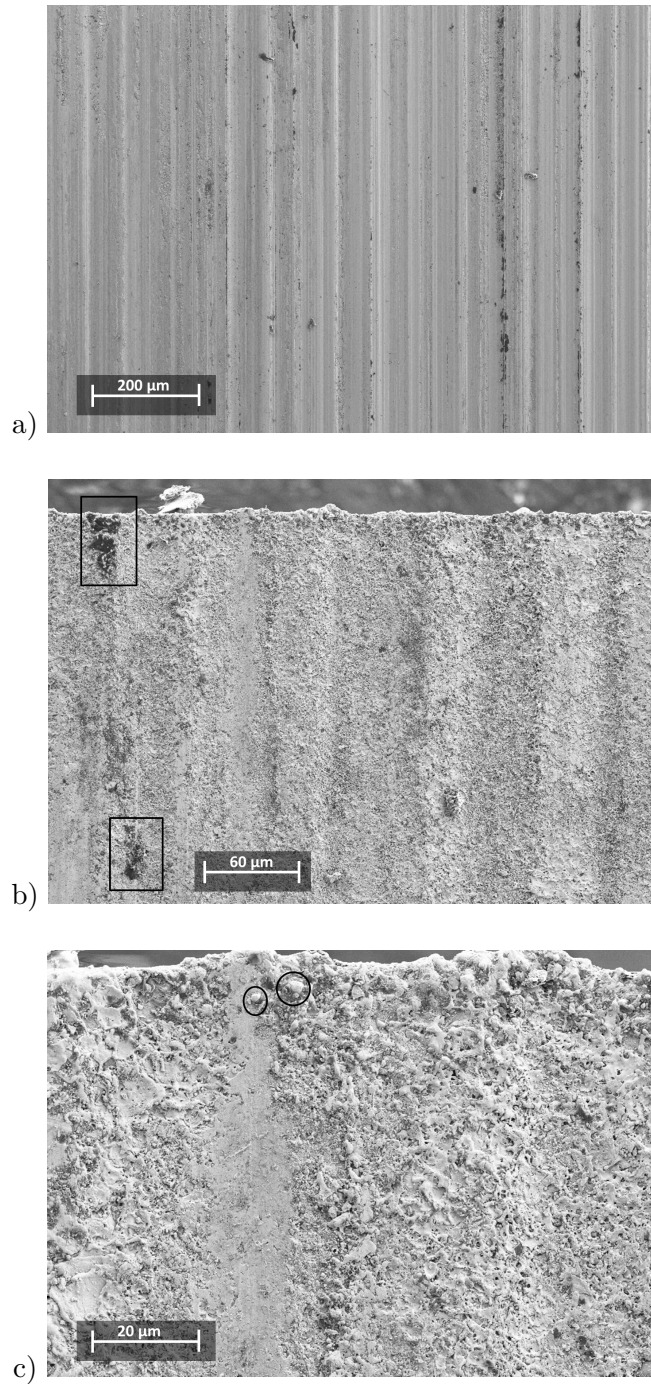


Abbildung 4.19: Mikrostruktur der mit PAIL-Öl geschmierten Kommutatoroberfläche nach 650h Dauerlauf.

Gefügestruktur

Im Gegensatz zur Referenzlamelle (Abb. 4.17) zeigt der FIB-Schnitt der Lamelle des

4.4 Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte

PAIL-Versuchs (Abb. 4.20) keine volle Bedeckung durch Fremdmaterial ihrer Oberfläche. Es ist zu beobachten, dass eine Gefügeänderung im oberflächennahen Bereich stattfindet. Die Körner, die unmittelbar unter der Oberfläche liegen, zeigen feine Größen. Die Tiefenwirkung endet bei einer Tiefe von ca. $4\text{ }\mu\text{m}$ von der Oberfläche. Im Bild 4.20 rechts (an der Stelle 2) ist eine horizontale Rissbildung im Gefüge zu beobachten. Die Fremdschicht setzt sich aus feinen runden Verschleißpartikeln, sowie aus eingebettetem Kohlenstoff zusammen, (Bereich 3, Abb. 4.20). An der Stelle 4 ist ein kreisförmiges Eindringen des Fremdmaterials in die Kupfermatrix zu beobachten. In der oberflächenveränderten Zone sind Poren (an der Stelle 5) ersichtlich. Die veränderte Zone weist eine Tiefe von ca. 900 nm auf.

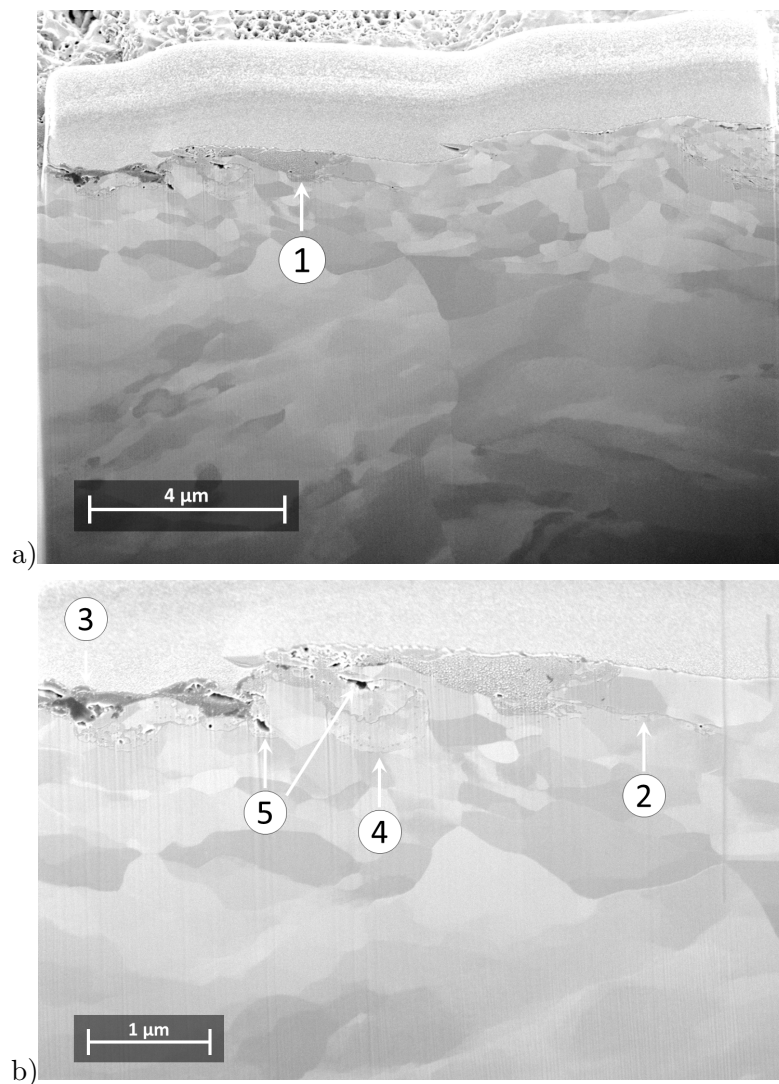


Abbildung 4.20: Gefügestruktur der Kupferlamelle des PAIL Versuchs nach 650h Dauerlauf. 1: Patina, 2: Riss, 3: Fremdschicht, 4: Eindringen des Fremdmaterials, 5: Defekte.

Chemische Analyse

Die Abb. 4.21 zeigt das Tiefenprofil der Kommutatorlamelle des Versuchs mit PAIL-Öl. Unmittelbar auf der Oberfläche ist eine Anreicherung vom C-Gehalt mit 65 At.-% vorhanden.

4 Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren

Der O-Gehalt liegt bei ca. 20 At.-% und ist doppelt so hoch, wie bei der Referenzprobe (Abb. 4.18). Das Bild 4.21 rechts zeigt, dass innerhalb von 100 nm der C- und O-Gehalt stark abnehmen. Nach 650 Stunden betrug die Dicke der Patinaschicht ca. 1 μm .

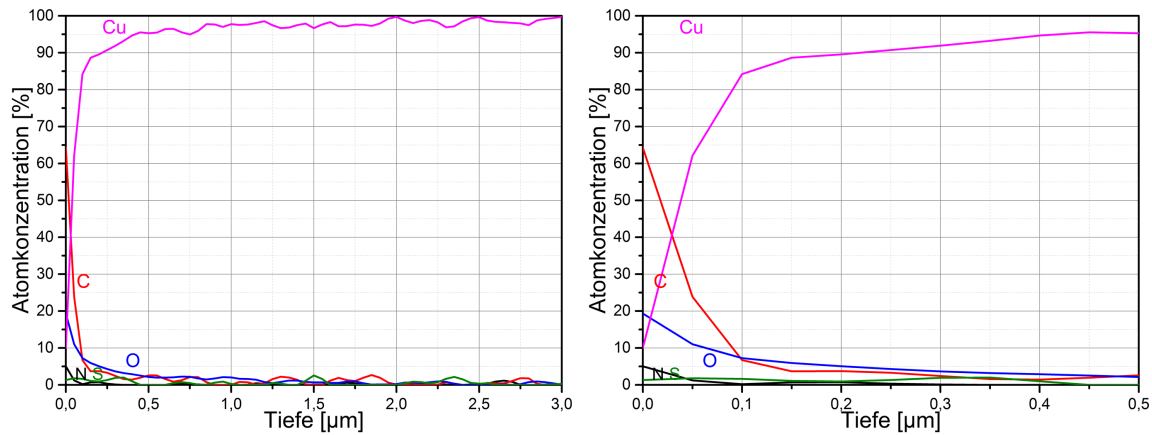


Abbildung 4.21: XPS-Tiefenprofil der Kupferlamelle des PAIL-Versuchs nach 650 h Dauerlauf.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass der mit leitendem Öl durchgeführte Dauerlaufversuch aufgeschmolzenes Material an den ablaufenden Lamellenkanten zeigt. Die Gefügestruktur zeigt neben der Kornverfeinerung im oberflächennahen Bereich eine Materialeinarbeitung in ihre Matrix. An der Oberfläche konnte ein hoher Kohlenstoffgehalt von 65 At.-% nachgewiesen werden. Es hat sich keine vollständige Patina (Dicke ca. 1 μm) an der Oberfläche gebildet.

4.4.2.3 Triboversuch mit PSL

Oberflächenmorphologie

In Abb. 4.22 sind REM-Aufnahmen der Kommutatoroberfläche des Triboversuchs mit PSL-Öl dargestellt. Die Oberfläche ist mit Riefen verschiedener Breiten durchzogen. Die meisten entstandenen Riefen sind mit Verschleißmaterial behaftet, wie die Stelle 1 in Abb. 4.22 a zeigt. Bei weiterer Vergrößerung sind zahlreiche Verschleißpartikel verschiedener Größe erkennbar (Abb. 4.22 b). Außerdem ist die Oberfläche teilweise mit dunkelfarbigem Material (möglicherweise Kohlenstoff) bedeckt. Eine Form eines Partikels ist in Abb. 4.22 c, an der Stelle 2 erkennbar. Seine Breite ist ca. 7 μm und ähnelt dem verkokten Kohlenstoff in seiner Form. In demselben Bild rechts erscheint ein ca. 12 μm längliches Material. Die Verschleißspuren unterscheiden sich im Kontrast und in der Struktur. Die linke Spur weist eine glatte Oberfläche und hellen Kontrast auf, wobei die Oberfläche der Nebenspur dunklen Kontrast und eingebettete Verschleißpartikel zeigt.

4.4 Post-mortem Charakterisierung der Reibkontakte

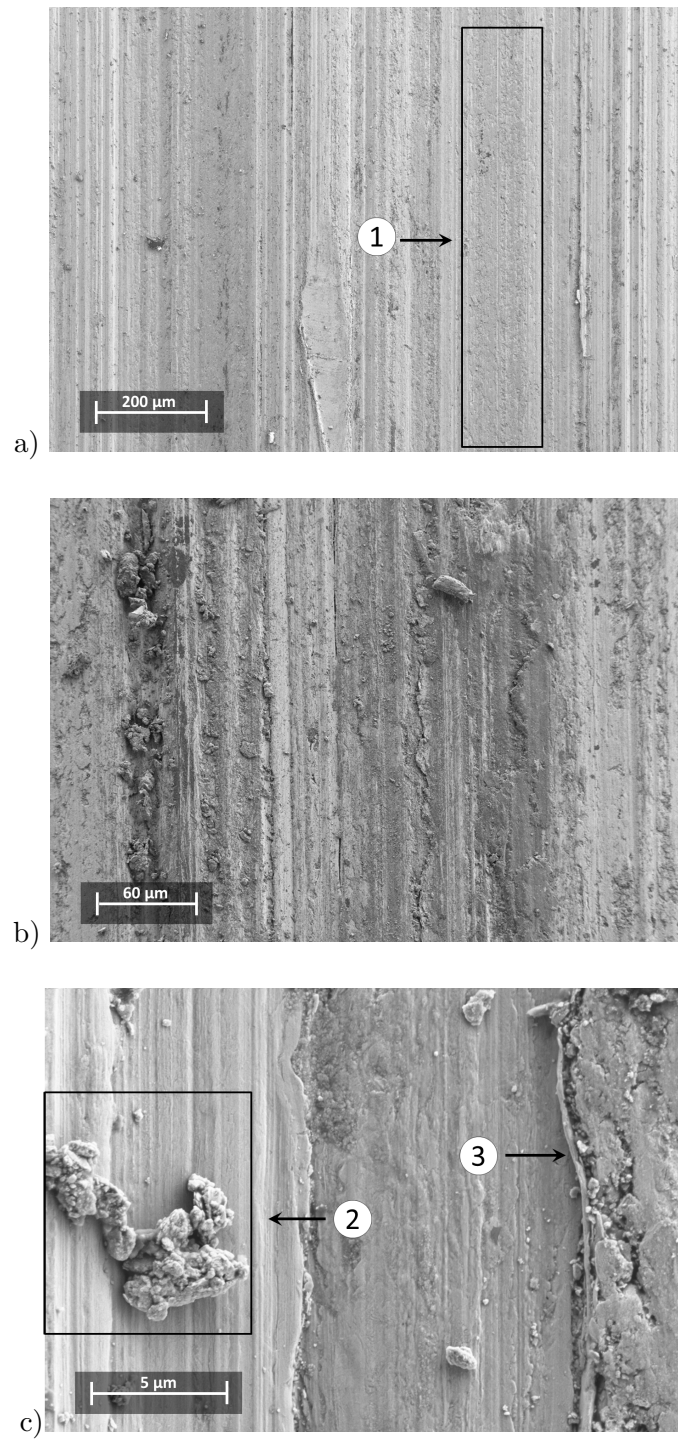


Abbildung 4.22: REM-Aufnahmen der mit PSL geschmierten Kommutatoroberflächen nach 650h Dauerlauf.
1: Agglomerate, 2: langartiges Verschleißmaterial.

Gefügestruktur

In Abb. 4.23 ist die Randschicht der Lamelle des Versuchs mit PSL-Öl zu sehen. Unmittelbar auf der Oberfläche zeigt sich eine ausgebildete Patina (Bild 4.23 b). Unter der Patinaschicht lassen sich feine Körner mit einer gemittelten Fläche von $0,2\mu\text{m}^2$ beobachten, deren Größe mit zunehmender Tiefe (bis ca. $6,5\mu\text{m}$) zunimmt. Die Patina dringt in die Kupfermatrix von rechts nach links ein und verbreitert sich parallel zur Oberfläche. Ein interessanter Unterschied zu den beiden anderen untersuchten Systemen zeigt sich im Auftreten von feinen kugelförmigen Strukturen ($<100\text{nm}$) in der Patina (Bild 4.23 b, Stelle 2).

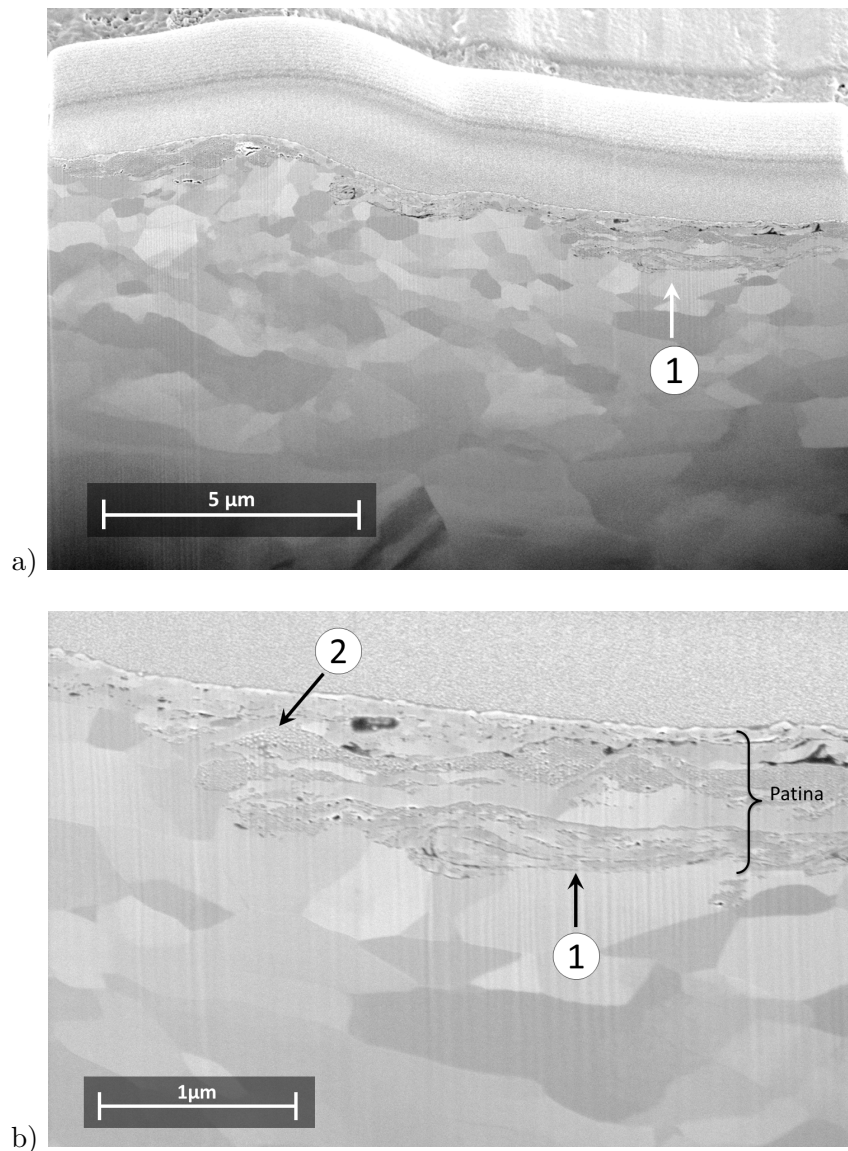


Abbildung 4.23: Gefügestruktur der Kupferlamelle des PSL Versuchs nach 650h Dauerlauf. 1: Eindringen der Fremdmaterialien in die Kupfermatrix, 2: kugelförmige Verschleißpartikel. Bild b stellt eine Vergrößerung des Bilds a dar.

Chemische Analyse

Abb. 4.24 zeigt das Tiefenprofil einer Kommutatorlamelle des PSL-Versuchs. An der Oberfläche der Lamelle ist ein erheblicher C-Gehalt nachweisbar. Dieser liegt bei 85 At.-% und fällt innerhalb der ersten 15 nm stark auf 10 At.-% ab. Dagegen liegt der O-Gehalt nur bei 2,5 At.-% und erreicht sein Maximum nach 3 nm. Ab dieser Tiefe verlaufen die O- und C-Signale parallel und weisen eine leichte Abnahme um ca. 4 At.-% auf. Die Dicke der Patina lässt sich zwischen 1 und 1,5 μm abschätzen.

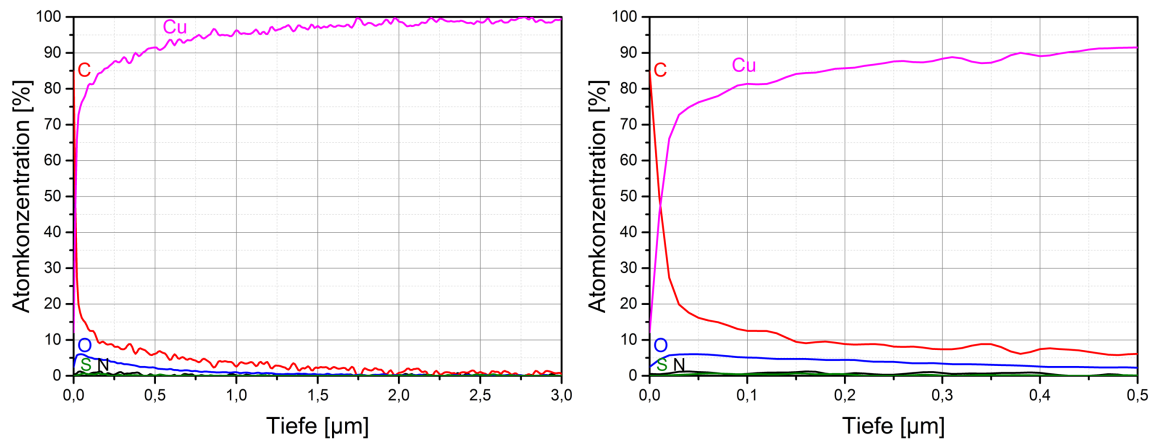


Abbildung 4.24: XPS-Tiefenprofil der Kupferlamelle im PSL-Versuch nach 650h Dauerlauf.

Zusammenfassend ist zu beobachten, dass sich an der Oberfläche des Kommutators grobe Agglomerate befinden. Außerdem weist die Oberfläche teilweise einen hohen Kohlenstoffgehalt auf. In dem Gefüge ist horizontal ausgedehntes Fremdmaterial nachweisbar. Ihre Bestandteile setzen sich aus kugelförmigen Partikeln zusammen. Die Patinadicke betrug nach 650 Stunden Dauerlauf ca. 1,5 μm .

4.5 Diskussion

In diesem Teil werden die in Abschnitt 4.3 und 4.4 vorgestellten Ergebnisse genauer erläutert und diskutiert. Zunächst wird der Einfluss des leitenden, sowie schlecht leitenden Schmieröls auf die Reibung und den Verschleiß der Reibkontakte untersucht. Weiter wird der Verhinderung des Stromflusses vom schlecht leitenden Schmieröl (PSL) bei angelegter Gleichspannung genau betrachtet und die daraus resultierenden Einflüsse auf das Tribosystem erläutert. Im letzten Abschnitt wird ein Verschleißmodell, das zum hohen Kommutatorverschleiß führt, vorgestellt.

4.5.1 Einfluss des Schmieröls auf die Reibung und den Verschleiß

Die in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 dargestellten Ergebnisse zeigten unterschiedliches Verschleißverhalten der Tribosysteme, abhängig von den verwendeten Schmierölen. Kommutatoren, die mit leitendem Öl geschmiert wurden, zeigten im Vergleich zur Referenzmessung sowohl, mit dem Kommutierungssystem (Abb. 4.10) als auch mit entfernten Kommutierungsspulen (Abb. 4.4) einen vergleichbaren Verschleiß auf. Im Gegensatz dazu wiesen die Kommutatoren, die mit schlecht leitendem Öl beölt sind, einen bis zu 10-fachen höheren Verschleißwert auf. Trotz der gleichen Initialrauheit der Kommutatoren- und Bürstenoberflächen zeigte der Einlaufbereich der Reibkoeffizienten der PSL- und PAIL-Versuche unterschiedliches Verhalten. Die Einlaufzeit ist die Zeit, während welcher der Kontakt zwischen den Reibpartnern vollständig ausgebildet [32][S. 17] und die Reibkraft nach der Einlaufzeit ihr Minimum erreicht hat. Der Versuch mit PAIL lässt sich durch eine kurze Einlaufzeit (ca. 2 Stunden) nachweisen. Jedoch dauerte die Einlaufzeit des Versuchs mit PSL ca. 10 Stunden, bis der stabile Reibkoeffizient erreicht wurde. In Abb. 4.25 ist der Zusammenhang zwischen dem Reibkoeffizienten und dem Verschleiß der Bürste von beiden Versuchen dargestellt. Es ist eine Korrelation zwischen dem Einlaufverhalten, bzw. der Einlaufzeit, und der Steigung des Verschleißsignals. In [32][S. 141] wurde beobachtet, dass Tribosystemen mit gutem Einlauf weniger Verschleiß verursacht wird.

Da der Reibungsversuch (bei $I = 0$ A) mit schlecht leitendem Öl (PSL) keine negativen Einflüsse auf den Einlauf aufgewiesen hat (Abb. 4.6), wird davon ausgegangen, dass der hohe Reibungskoeffizient nicht von den mechanischen Eigenschaften des PSL-Öls beeinflusst wurden. Die Ursache des instabilen Reibungsverhaltens während der Ölkontamination könnte durch auftretende Mechanismen aufgrund der Stromflussbehinderung sein. Die Erscheinung der Lichtbögen zwischen der Plusbürste und dem Kommutator bestätigt diese Vermutung (Abb. 4.8). Des Weiteren wurde bei jeder Ölkontamination eine Temperaturerhöhung in der Bürste beobachtet (Abb. 4.26 c). Diese Aussage wird durch das Widerstandsdiagramm (in Abb. 4.5 rechts) unterstützt. Der Widerstand wurde nach Gl. 4.2 ermittelt. Im Einlaufbereich ist das Widerstandsverhalten analog zum Reibsignal schwankend und erreicht sein Maximum. Um diese Behauptung diskutieren zu können, ist ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Parametern (Reibkoeffizient, Widerstands- und Bürstentemperatur) im Fall der PSL-Beölung erforderlich. Es ist offensichtlich, dass unmittelbar nach der Ölkontamination ein Anstieg des Reibungskoeffizienten, des Widerstands und der Bürstentemperatur auftritt. Der Ablauf der Lichtbogenentstehung kann wie folgt erklärt werden. Im Moment der Kontamination des schlecht leitenden Öls findet lokale Kontakttrennung statt. Abhängig von der Schichtdicke tunneln die Elektronen der dünnen Ölschicht durch. Im Fall der

dicken Ölschichten ($> 1 \text{ nm}$) trennen sich die realen Kontaktflächen durch eine Ölschicht, deren Dicke höher, an der Einflusszone des Tunneleffekts ist. Im Falle der Kontaktisolation kommt es zum elektrischen Durchschlag im flüssigen Isolierschmieröl. Eine Voraussetzung ist eine ausreichende Feldstärke von ca. 10^7 V/cm , sowie freie Ladungsträger, die im Dielektrikum zur Verfügung stehen [11][S. 34]. Die zum Durchschlag benötigten Ladungsträger im Dielektrikum können durch Gasblasen, Elektronenlawinen und Partikel auftreten [20]. Eine lokale Erhitzung aufgrund des Stromflusses, bzw. der Reibungswärme, kann die Siedetemperatur des Öls erreichen und somit Verdampfung verursachen. Eine andere Quelle, die für den Ladungsträger sorgt, sind leitfähige Abtragspartikel aus dem Bürsten- und Kommutatorwerkstoffen. Diese Partikel können ionisiert sein und eine Brücke durch ihre Orientierung längs zu den Feldlinien zwischen den Elektroden bilden. Dadurch kann ein elektrischer Durchschlag eingeleitet werden. Die genannten Mechanismen tragen zur Vermehrung der Ladungsträger und somit zur Erhöhung der Leitfähigkeit an einigen Stellen zwischen Kohlebürste und Kommutator bei. Als Folge bildet sich eine Trägerlawine, die zum elektrischen Durchschlag führt. Das Resultat ist einen Materialabtrag der beteiligten Werkstoffe. Dieser erfolgt solange, bis die Schmelztemperatur des Kupfers (1085 °C) erreicht wird und sich das Kupfer vom festen in den flüssigen Zustand umwandelt. Auf der Seite des Graphits findet ein Oxidationsprozess statt und je nach der Temperaturstärke verdampft der Kohlenstoff in Form von CO_x . Dadurch ändern sich die chemischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften der beanspruchten Stelle und führen somit zum Materialabtrag. Die Anlagerung der Verschleißpartikel unter der Bürsten führen zur lokalen Kontakttrennung und somit zur Widerstandserhöhung. Dieser Prozess ist solange wiederholbar, bis sich das Tribosystem stabilisiert, und das Auftreten der Lichtbögen minimiert. Die Stabilisierung des Tribosystems erfolgte nach ca. 20 Stunden der letzten Ölkontamination (Abb. 4.5 b). Aus diesen Ergebnissen kann festgestellt werden, dass die Kombination zwischen Strom und schlecht leitendem Öl eine Ursache der Beeinträchtigung des Tribosystems ist und so mit höchster Wahrscheinlichkeit daraus resultierendem Verschleiß einhergeht.

Im Gegensatz dazu, führt die Schmierung mit leitendem Öl zum schnellen Einlauf des Tribosystems. Nach der Einlaufphase stabilisiert sich der Reibwert auf einem konstanten Niveau. Dabei würde das leitende PAIL-Öl keine Störung im Stromfluss verursachen, sondern zur Vergrößerung der leitenden Kontaktfläche beitragen. Des Weiteren weisen ionische Flüssigkeiten in elektrisch leitenden Kontakten eine gute Schmierwirkung auf. Dabei bilden sich zwischen der Anode und der Kathode Schichten aus. Durch eine verstärkte Adsorption der hochgeordneten Ionen an der Grenzfläche, reduzierte sich der Reibungskoeffizient des Tribosystems.

4 Geschmierte elektrische Reibkontakte in DC-Motoren

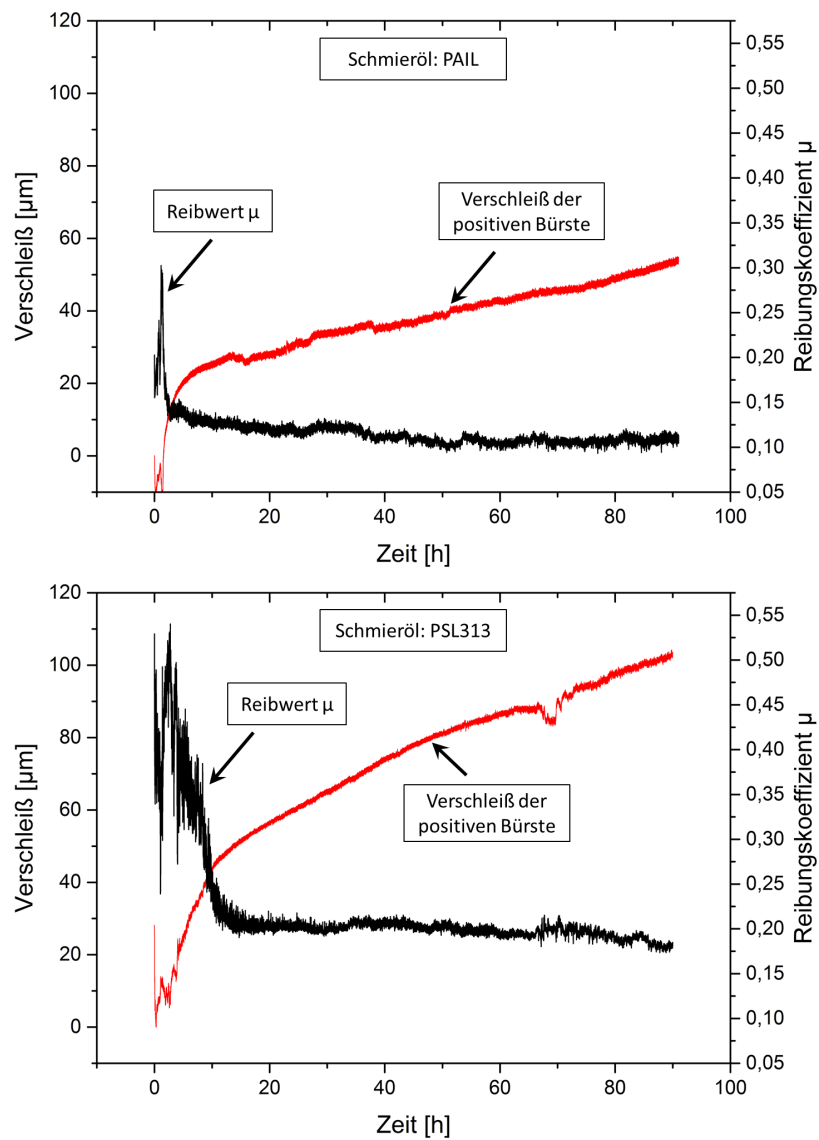


Abbildung 4.25: Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und dem positiven Bürstenverschleiß bei der PAIL- (oben) und PSL-Schmierung (unten).

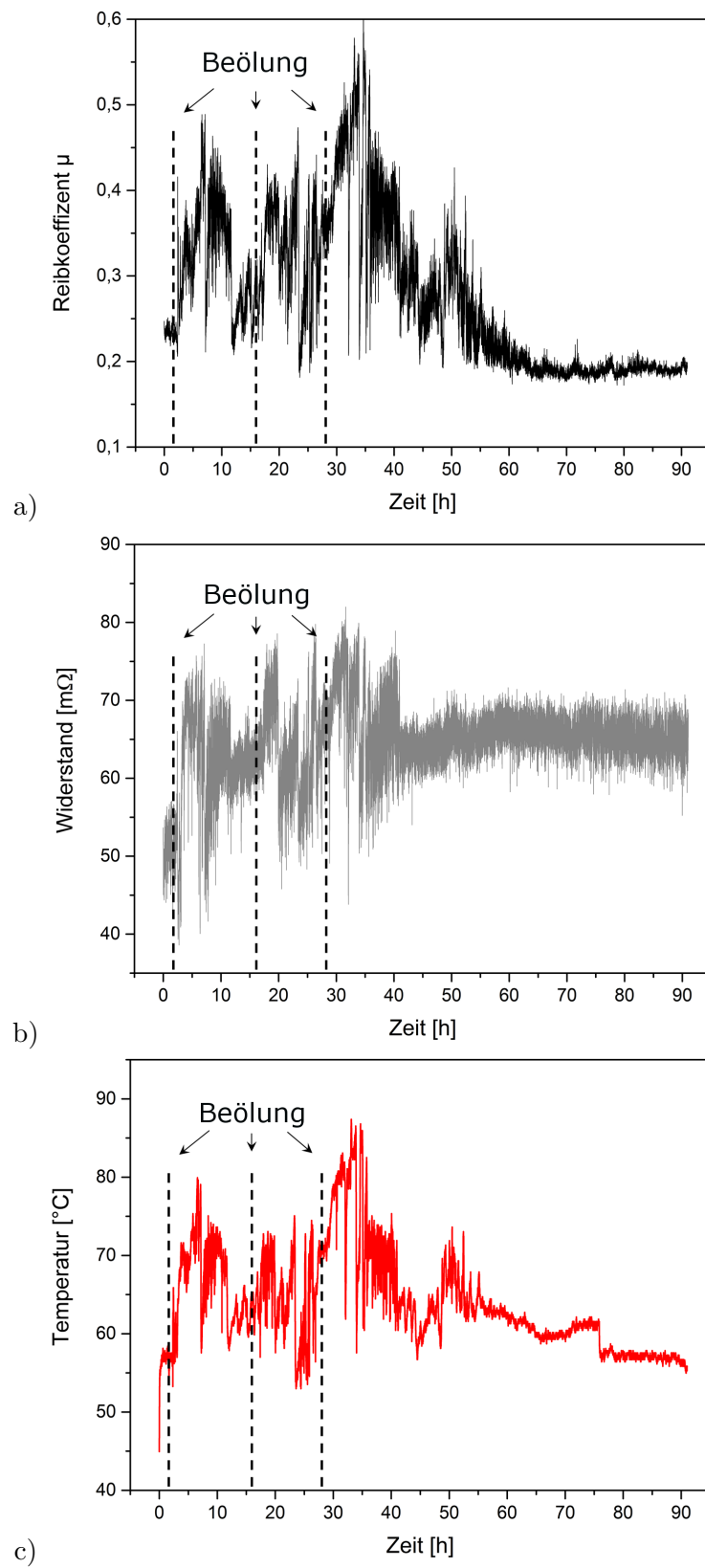


Abbildung 4.26: Zusammenhang zwischen dem Reibkoeffizienten, Widerstand und der Bürstentemperatur bei wiederholter PSL Ölkontamination.

4.5.2 Modell zum Kommutatorverschleiß

In diesem Abschnitt werden die Kenntnisse der Triboversuche, sowie der Analytik von Konfokalaufnahmen, FIB-Schnitten, REM-Aufnahmen und XPS-Tiefenprofilen verwendet, um ein Verschleißmodell zum Bürste-Kommutator-System zu erstellen. Nach bisherigen Erkenntnissen verursachen die schlecht leitenden Schmieröle den hohen Verschleiß des Tribosystems. Da Kupfer einen härteren Werkstoff, als Graphit ist, soll der Kommutatorverschleiß im Vergleich mit dem der Bürste minimal sein. Das ist nicht der Fall bei Schmierung mit schlecht leitenden Ölen. Im Gegensatz dazu hat der Versuch mit leitendem Schmieröl (PAIL) einen sehr geringen Kommutatorverschleiß gezeigt. Es stellt sich nun die Frage: Wie entsteht der hohe Kommutatorverschleiß bei Schmierung mit nicht leitenden Ölen? Abb. 4.27 stellt ein Verschleißmodell des Tribosystems, basierend auf Lichtbogen dar.

Der Anfangspunkt für dieses Modells liegt im Augenblick der Ölkontamination. Als Folge trennen sich die realen Kontaktflächen durch das nicht leitende Öl ab. Die lokale Trennung der realen Kontaktfläche behindert den Stromfluss von der Bürstenseite zum Kommutator. Nach der Theorie der Elektronenlawinen im Dielektrikum bilden sich Dampfkanäle, Partikelbrücken und Elektronenlawinen zwischen den Elektroden, welche den Strom leiten können. Eine Stromleitung kann stattfinden, wenn eine genügend hohe Feldstärke und Ladungsträger vorhanden sind. Die Feldstärke zwischen der positiven Kohlebürste und dem Kommutator bei einem Abstand $d = 10 \mu\text{m}$ und einer Spannung $U = 12 \text{ V}$ beträgt 12 kV/cm . Die Ladungsträger können aus der Kathodenoberfläche durch Feldemission, Thermoemission bzw. Thermo-Feld-Emission bereitgestellt werden. Bei genügend Feldstärke werden die Elektronen stark beschleunigt und diese zum Einen Ölmoleküle dissoziieren und zum Anderen neutrale Atomen durch Stoßionisation ionisieren. Die Ladungsträger bilden eine Trägerlawine und dadurch entsteht einen Entladungskanal, der in beiden Richtungen die Anode und Kathode erreicht [74]. Die Spannung bricht auf die Brennspannung $u = 14 \text{ V}$ (siehe Abb. 4.9) ab und es bildet sich in diesem Entladungskanal ein Lichtbogen aus. Der Lichtbogen hat eine Erhöhung der Temperatur im Kontaktbereich (Abb. 4.26) zur Folge. Am Fußpunkt des Lichtbogens erhitzt das Kupfer. Es geht in den flüssigen Zustand über, bis seine Siedetemperatur erreicht wird (Abb. 4.27 links). Das flüssige Kupfer erstarrt nach der Abkühlung in kugelförmige Kupferpartikel (Abb. 4.27 Mitte). An der Kopfstelle des Lichtbogens erhitzt sich der Kohlenstoff und wird somit zum oxidierten Kohlenstoff umgewandelt. Daraus resultiert ein Materialtransport zwischen Lamellen und Bürsten, sowie zwischen den Lamellen selbst (Abb. 4.27 rechts). Die Folge ist ein erhöhter Kommutator- und Bürstenverschleiß. Die Prozessschritte des Verschleißablaufs sind im Fließdiagramm in Abb. 4.28 dargestellt.

Bei einem wiederholten Prozess vergrößert sich die Anzahl der Verschleißpartikel zwischen den Kontakten und zeigt somit den Reibungskoeffizienten ein instabiles Signalverhalten (Abb. 4.26 a). Der Kontaktwiderstand zeigt analog zur Temperatur und Reibung ein instabiles Verhalten. Die Dauer dieser Phase beträgt bei einer einmaligen Ölkontamination ca. 4 bis 5 Stunden und wiederholt sich bei kontinuierlicher Ölkontamination (siehe Abb. 4.7 und Abb. 4.26 a). Aufgrund der Existenz des Öls im Kontaktbereich können die aufgrund der Erosion entstandenen Verschleißpartikel nicht einfach die Reibfläche verlassen. Es bilden sich stattdessen Agglomerate. Agglomerate sind ein Verbund aus Verschleißmaterial und Öl. Diese Agglomerate kommen in verschiedenen Größen und Härten vor (Abb. 4.22 c). Zum Einen haften sie unter der Bürste, zerkleinert durch die Reibung und anschließend in die Oberflächen eingedrückt. Zum Anderen werden die Agglomerate zwischen den Lamellen des

Kommutators abgelegt, was zur Beeinträchtigung des Kommutierungsverhaltens aufgrund des Lamellenkurzschlusses führen könnte (Abb. 4.11 c). Die Haftung der harten Agglomerate zwischen den Kontakten führen zum abrasiven Verschleiß und somit zu rauen Oberflächen (Abb. 4.4 und Abb. 4.14). Weiche Verschleißpartikel, die hauptsächlich aus Kohlenstoff bestehen, können in die Patinaschicht eingedrückt werden. Die XPS-Tiefenprofile der Lamellenoberfläche vom Versuch mit PSL (Abb. 4.24) zeigten einen hohen Kohlenstoffgehalt (ca. 80 At.-%) innerhalb der ersten 50 Nanometer. Diese Kohlenstoffschicht lässt sich mit REM-Aufnahmen (wie in Abb. 4.22a gezeigt), optisch erkennen. Des Weiteren dringt Fremdmaterial in die Kupfermatrix ein, wie in Abb. 4.23 mithilfe des FIB gezeigt werden konnte. Das in die Matrix eingearbeitete Material könnte durch den sogenannten Folding-Effekt erklärt werden. Dieser Effekt entsteht durch mehrere Faltungen des Kupfers aufgrund von plastischen Deformationen, die durch Reibbelastung hervorgerufen werden [32][S. 127]. Zusätzlich beeinträchtigt das in die Matrix eingedrungene Material die Festigkeit des Kupfers und führt zum leichteren Materialabtrag aus der Oberfläche. Dieser Prozess hinterlässt Vertiefungen an den Stellen und führt zu rauen Oberflächen, was wiederum in hohen Reibwerten resultiert. Dieser Prozess wiederholt sich solange das Öl die Kontaktfläche kontaminiert.

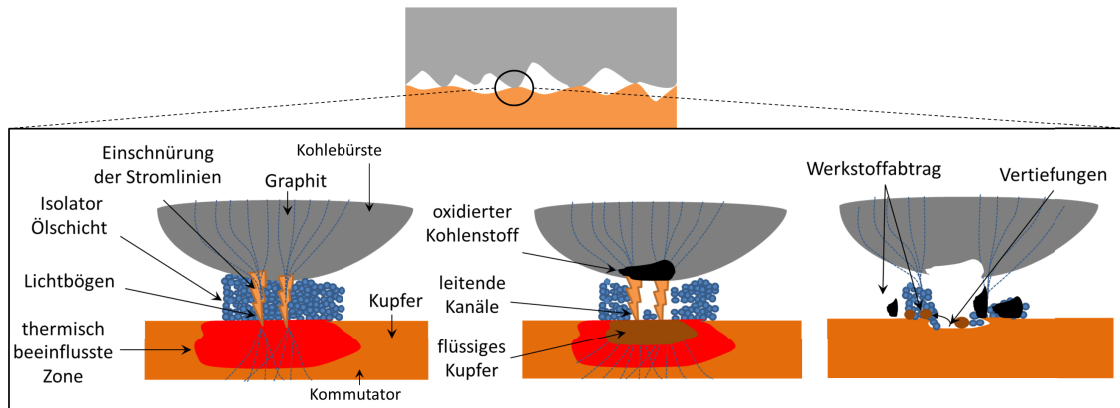


Abbildung 4.27: Modell zum Kommutatorverschleiß bei der Kontamination des nicht leitenden Öls.

Nach der Einwirkungsphase des Öls stabilisiert sich das Tribosystem und zeigt dann ein gutes Reibungs- und Widerstandsverhalten. Dieses Verhalten ist in Abb. 4.6 links, Abb. 4.7 (rote Kurve) und in Abb. 4.26 zu erkennen. Im Reibungskontakt können aufgrund der Reibungswärme sowie des elektrischen Widerstands des Graphits hohe Temperaturen entstehen. Es entstehen im Kontaktbereich zahlreiche chemische Reaktionen. Außerdem führt das in lokal erhitzten Bereichen zur Schmelzung und Verdampfung des Werkstoffs. Das Schmieröl wird ebenfalls durch die Überhitzung verdampft oder zersetzt. Durch die Drehbewegung werden die entstandenen Verschleißpartikel zerkleinert, in die Oberflächen gedrückt und aus der Reibfläche entfernt. Solange keine Ölkontamination vorkommt, bilden sich metallische Kontakte, die zum Stromtransport führen. Das Tribosystem befindet sich im normalen Zustand.

Das Flussdiagramm in Abb. 4.28 verdeutlicht den Ablaufprozess des Systemverschleißes während der Kontamination mit schlecht leitendem Schmieröl dar. Das schlecht leitende Schmieröl führt zur Verkleinerung der elektrisch leitenden Kontaktfläche zwischen der Kohlebürste und dem Kommutator. Zum Einen erhöht sich dadurch der Kontaktwiderstand

und somit auch die Kontakttemperatur. Zum Anderen entstehen hohe Stromdichten an den realen Kontaktpunkten. Die Stromdichte in diesen Stellen kann bis 200 kA/cm^2 betragen [11][S.157]. Demzufolge kommt es bei ausreichender Feldstärke zum elektrischen Durchschlag im flüssigen Isolierschmieröl. Zum Einen führt es zur Verschlechterung der Öleigenschaften infolge der Zersetzung des Öls. Zum Anderen entstehen Verschleißpartikel aus den beteiligten Werkstoffen. Die Verschleißpartikel und das Öl bilden Agglomerate, die zur Erhöhung der Reibung führen. Durch die vermehrten Verschleißpartikel sowie Agglomerate entstehen tiefe Riefen im Kontakt und führen zu rauen Oberflächen, was wiederum in hohen Reibwerten resultiert. Dieser Prozess bildet den Verschleiß des Systems.

Im Fall des leitenden Schmieröls vergrößert sich die elektrisch leitende Kontaktfläche bei der Ölkontamination. Dabei erreicht der Widerstand sein Minimum nach ca. 10 Minuten und steigt wieder an, bis ein konstanter Verlauf nach ca. 2 Stunden erreicht wird. Im Vergleich zum nicht leitenden Öl können bei der Schmierung mit leitfähigem Öl in der Einlaufphase keine Lichtbögen entstehen, die hohe Verschleißpartikel verursachen. Dadurch käme das Tribosystem zum schnelleren Einlauf (Abb. 4.6 links).

Somit erfüllt das leitende Schmieröl seine Aufgaben, den Verschleiß des Tribosystems zu minimieren, ohne den Stromfluss zu verhindern. Im flüssigen Öl liegt eine Ionenleitung vor. Durch den Einfluss des elektrischen Feldes wirkt eine Kraft auf die Ionen, welche den elektrischen Stromfluss durch das leitende Öl ermöglicht. Dabei wandern die positive Ionen (P^+) zur Kathode und die negative Ionen (N^-) zur Anode. An der Kathode nehmen die positiv geladenen Kationen Elektronen auf und werden reduziert. Im Gegenzug dazu geben die negativ geladenen Anionen Elektronen ab. Dieser Prozess wird als Elektrolyse bezeichnet.

Das Tribosystem hat minimale Verschleißwerte, sowohl am KBP als auch am Dauerlaufprüfstand aufgewiesen. Es konnte aber keine Patina nach 650h auf dem Kommutator ausgebildet werden (Abb. 4.20). Außerdem wurden keine rauen Oberflächen (Abb. 4.13 und Abb. 4.14 Mitte) gesehen. Diese könnten aufgrund der mangelhaften Verschleißpartikel fehlen. An den ablaufenden Kanten der Lamellen sind Schmelzkrater aus Kupfer zu erkennen (Abb. 4.19). Dieser Effekt wurde höchstwahrscheinlich durch den Lichtbogen aufgrund der unvollständigen Stromkommutierung verursacht. Bei dieser wird die Potentialdifferenz in Form von Lichtbögen ausgeglichen.

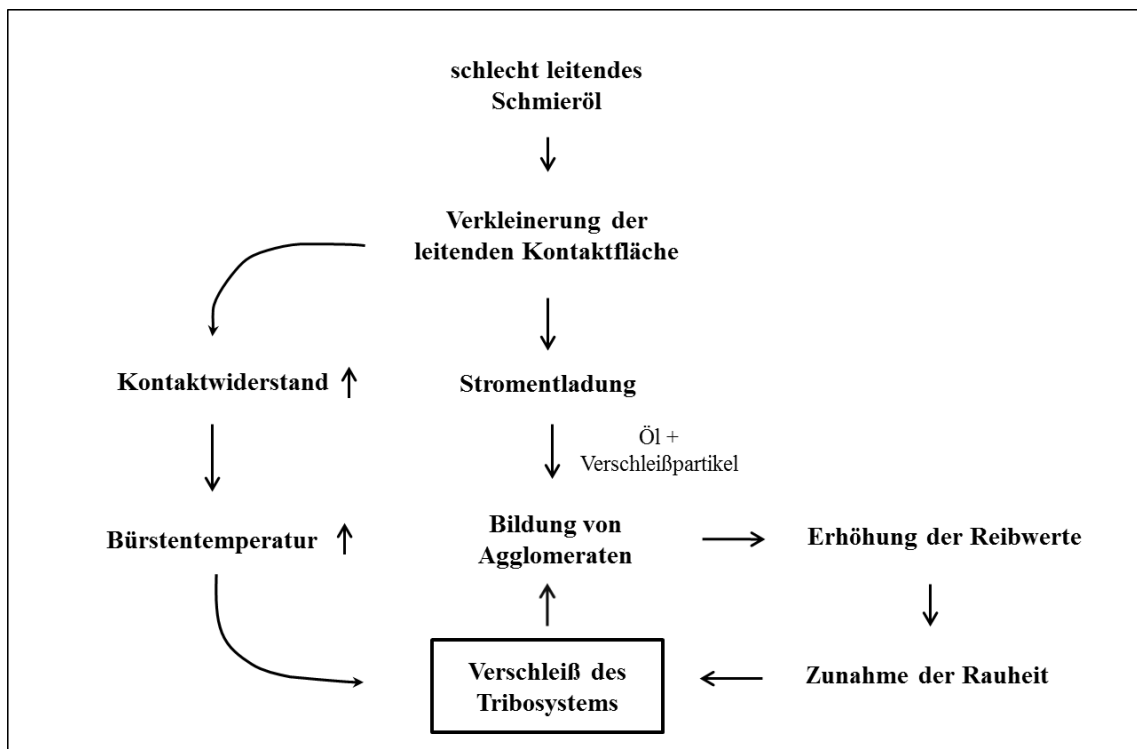


Abbildung 4.28: Flussdiagramm zum auftretenden Verschleißprozess während der Ölkontamination des schlecht leitenden Schmieröls.

5 Einfluss der Sintertemperatur auf das Bürstenverhalten

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Sintertemperatur auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kohlebürste untersucht. Beginnend wird die Zielsetzung der Untersuchung vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse aus mechanischer und chemischer Charakterisierung der untersuchten Proben erläutert, bevor diese im letzten Abschnitt diskutiert werden.

5.1 Zielsetzung

Sintern ist ein Prozess der Wärmebehandlung, welcher bei den Kohlebürsten angewendet wird (Kapitel 2, Abschnitt 2.2.1). Während des Sintervorgangs verdichtet sich das Material der behandelten Kohlebürste unter dem Einfluss von Druck und Wärme durch einen atomaren Werkstoff austausch zwischen sich berührenden Partikeln und führt zur Verminderung der Hohlräume bzw. Poren. Dadurch erhöht sich die mechanische Festigkeit und die elektrischen Eigenschaften der Kohlebürsten verbessern sich [90]. Es kann dennoch während des Sinterprozesses zu Fehlern kommen. Bei der Untersuchung der gesinterten Kohlebürsten am Kohlebürstenprüfstand KBP zeigten einige Bürsten einen hohen Spannungsabfall. Die Kohlebürsten mit hohem Spannungsabfall werden weiterhin als fehlerhafte Kohlebürsten bezeichnet. Zur Charakterisierung dieser Bürsten werden deren mechanische und chemische Eigenschaften bestimmt. Zusätzlich wird das Verhalten der fehlerhaften Kohlebürsten auf den Verschleiß durch Prüfstandversuche untersucht.

Ziel der Forschung ist es, die fehlerhaften Kohlebürsten durch verschiedene Analysemethoden zu charakterisieren, um die aufgrund von Sinterfehlern resultierenden Einflussfaktoren zu identifizieren.

5.2 Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten

Die fehlerhaften Bürsten, die durch Wirbelstrommessung getestet wurden, wiesen einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand auf. Die Kohlebürsten, die nach dem Sinterprozess einen spezifischen elektrischen Widerstand, höher als $2,5 \mu\Omega\text{m}$, aufwiesen, werden im Folgenden hochohmige Bürsten genannt. Nach dem Wiederholen des Sintervorgangs ließ sich eine deutliche Verminderung des spezifischen Widerstands der Kohlebürste erkennen. Aus diesem Grund werden die Kohlebürsten, die hohe elektrische Widerstände aufgewiesen haben, als fehlerhaft gesinterte Bürsten bezeichnet.

In diesem Abschnitt werden die fehlerhaft gesinterten Kohlebürsten durch verschiedene Analysemethoden untersucht und charakterisiert, um die aufgrund eines Sinterfehlers resultierenden Einflussfaktoren zu identifizieren. Dazu werden die elektrischen und tribologischen

5 Einfluss der Sintertemperatur auf das Bürstenverhalten

Eigenschaften der fehlerhaften Bürsten im Tribokontakt untersucht. In späteren Abschnitten wird die Festigkeit der fehlerhaften Kohlebürsten durch einen Druckversuch beurteilt. Schließlich wird die chemische Zusammensetzung der auffälligen Kohlebürsten mit dem Fokus auf die Korngrenzen durch Röntgenphotoelektronenspektroskopie XPS und Augerelektronenspektroskopie AES bestimmt, um eine Korrelation mit oben genannten Einflussfaktoren zu bestimmen. Die Ergebnisse werden im Vergleich mit den fehlerfreien Kohlebürsten präsentiert.

5.2.1 Verhalten der hochohmigen Bürste am Kohlebürsten-Prüfstand

Um den Einfluss des spezifischen elektrischen Widerstands auf das Verhalten der Bürste zu untersuchen, wurden tribologische Versuche mit niederohmigen, sowie hochohmigen Kohlebürsten am KBP durchgeführt. Dazu wurde zunächst der spezifische elektrische Widerstand ρ der Bürsten durch das Wirbelstromverfahren (siehe 2.4.3.7) gemessen. Um eine Veränderung der tribologischen Kontaktfläche zu vermeiden, wurden die Widerstandsmessungen an den Bürstenseiten, bzw. parallel zur Kontaktfläche, durchgeführt (siehe Abb. 2.27 rechts). Kohlebürsten, die einen spezifischen Widerstand, höher als $2,5 \mu\Omega\text{m}$ besitzen, werden als hochohmige Bürsten bezeichnet. Die spezifischen Widerstände der untersuchten Bürsten sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Die KBP-Versuche wurden bei Raumtemperatur von 25°C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % durchgeführt. Die Drehzahl wurde auf 2000 min^{-1} eingestellt und ein Stromwert von 7 A realisiert. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Es wurden vier tribologische Versuche am KBP ohne Kommutierung durchgeführt. Die untersuchten Bürsten wiesen dabei unterschiedliche Widerstände auf. Der Spannungsabfall, die Bürstentemperatur, sowie der Verschleiß wurden bei diesen Versuchen gemessen. Die Messverfahren zu den genannten Größen sind im Abschnitt 2.4 beschrieben.

	$\rho [\mu\Omega\text{m}]$	Strom [A]	Drehzahl [min^{-1}]	Versuchszeit [h]
Versuch 1	2,4	7	2000	15
Versuch 2	50,2			
Versuch 3	54,6			
Versuch 4	66,2			

Tabelle 5.1: Versuchsparameter des Kohlebürstenprüfstands KBP.

In Abb. 5.1 a ist der gemittelte Spannungsabfall der Plusbürste über dem spezifischen Widerstand aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass der Spannungsabfall mit zunehmendem elektrischem Bürstenwiderstand ansteigt.

Abb. 5.1 b zeigt den Mittelwert der Bürstentemperatur als Funktion des spezifischen Widerstands. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Temperaturmessstelle um 2 mm von der Kontaktfläche der Kohlebürste entfernt lag. Analog zum Spannungsabfall steigt die Temperatur der Bürste mit zunehmendem Bürstenwiderstand an.

Die Verschleißraten der Kohlebürsten sind in Abb. 5.1 c dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Verschleißraten mit zunehmendem spezifischen Bürstenwiderstand steigen. Darüber hinaus nimmt die Verschleißrate der Kohlebürsten mit einem spezifischen Widerstand von $\rho = 66,2 \mu\Omega\text{m}$ um den Faktor 8, im Vergleich zur Bürste mit $\rho = 2,4 \mu\Omega\text{m}$, zu.

5.2 Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten

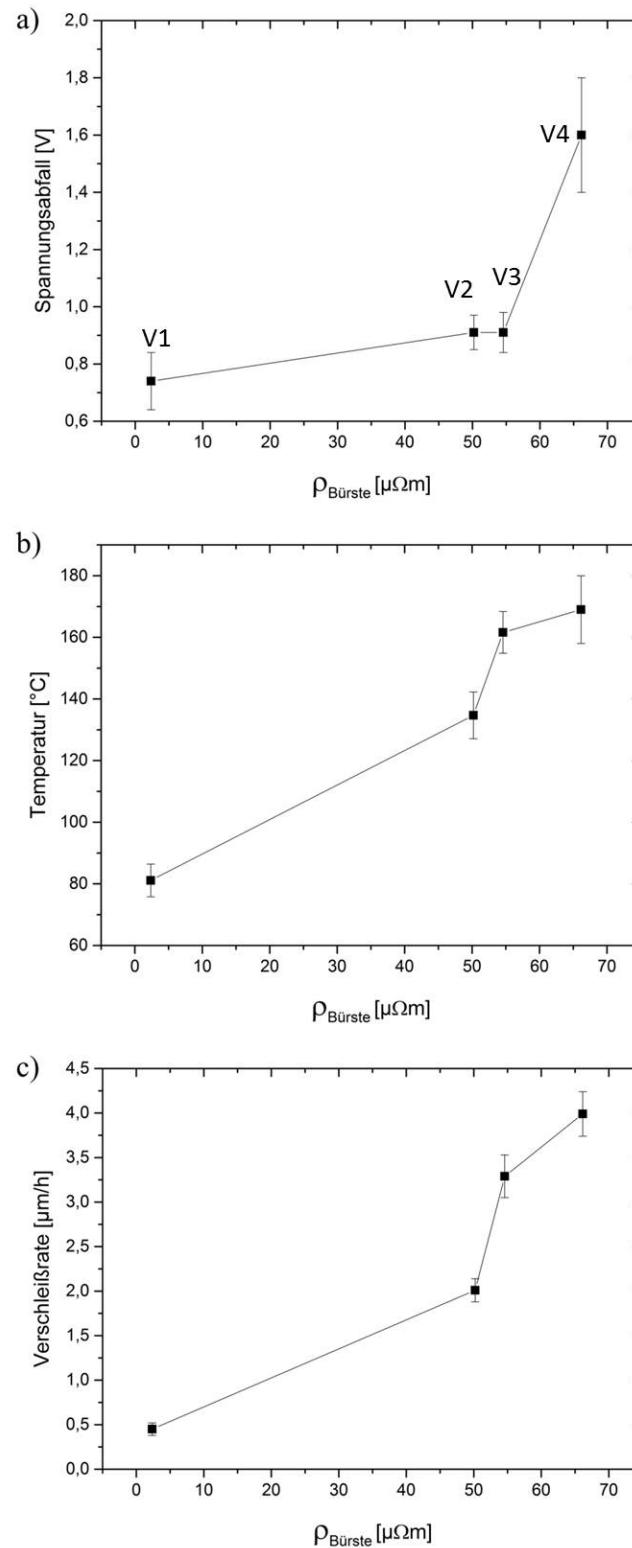


Abbildung 5.1: Einfluss des spezifischen elektrischen Widerstands auf den Spannungsabfall (a), die Temperatur (b) und den Verschleiß (c) der Bürste.

5.2.2 Mechanischer Druckversuch

Das mechanische Verhalten der Kohlebürsten mit unterschiedlichen spezifischen elektrischen Widerständen wurde in Druckversuchen unter quasistatischen Belastungsbedingungen ermittelt. Hierzu wurden die Bürsten in Längsrichtung bis hin zum Bruch belastet. Zur möglichst weitgehenden Vermeidung lokaler Überlastungen im Andruckbereich und wegen unzureichender Planparallelität der Probenoberflächen wurde ein Druckstempel mit Ausgleichskalotte verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 5.2 dargestellt.

Die Prüfung erfolgte in einer servohydraulischen (Schenck PEZ 2221) Universalprüfmaschine bei einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min. Während des Versuchs wurden der Maschinenweg und die resultierende Kraft am Druckstempel kontinuierlich erfasst. Auf eine direkte Dehnungsmessung an der Probe wurde auf Grund der starken Steifigkeitsunterschiede zwischen Probe und Versuchsaufbau verzichtet.

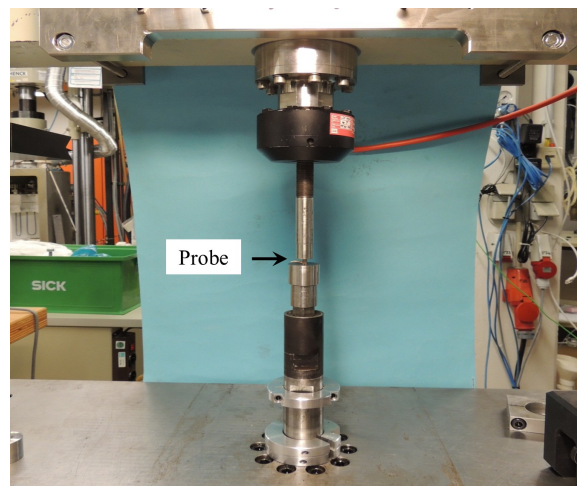


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Kohlebürsten.

Aus den gemessenen Kraft-Verschiebungskurven wurden unter Verwendung der gemessenen Probenbreite, -höhe und -tiefe nominelle technische Spannungs-Dehnungskurven ermittelt. Aus den Ergebnissen wurden das Tangentenmodul E^* als Steigung der Ausgleichsgeraden zwischen $\sigma_{\text{tech}} = 5 \text{ MPa}$ und $\sigma_{\text{tech}} = 10 \text{ MPa}$, sowie die maximale Spannung σ_{max} und die Spannung σ_{pop} ermittelt. Das Tangentenmodul stellt ein Maß für die Steifigkeit dar, während die Maximalspannung die Festigkeit charakterisiert.

Die niederohmige Bürste zeigt (Abb. 5.3) im Anfangsbereich ein nahezu ideal lineares Spannungs-Dehnungsverhalten mit einem Tangentenmodul von $E^* = 1402 \text{ MPa}$. Bei einer Last von 25.1 MPa kommt es durch einen Kantenabbruch an der unteren Auflagefläche zu einem ersten Einbruch der resultierenden nominellen Spannung, jedoch ohne vollständigen Tragfähigkeitsverlust. Im Anschluss daran kommt es zu einem Wiederanstieg der resultierenden nominellen Spannung bis zu einem Maximalwert von 28.9 MPa. Das endgültige Versagen erfolgte durch Bildung von Längsrissen (vgl. 5.4 links).

Die hochohmige Bürste zeigt (Abb. 5.3) im Vergleich zur niederohmigen Bürste im Anfangsbereich ein steiferes Verhalten. Jedoch tritt im vorliegenden Fall bereits früh eine Nichtlinearität auf und der Verlauf der Spannung flacht zum Maximalwert hin ab. Die Festigkeit dieser

5.2 Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten

Probe liegt mit 23,7 MPa um 17,8% niedriger, als die maximale Festigkeit der niederohmigen Probe. Das Versagen erfolgte ohne vorangehende lokal beschränkte Versagensereignisse durch Längsrisssbildung (vgl. Abb. 5.4 rechts).

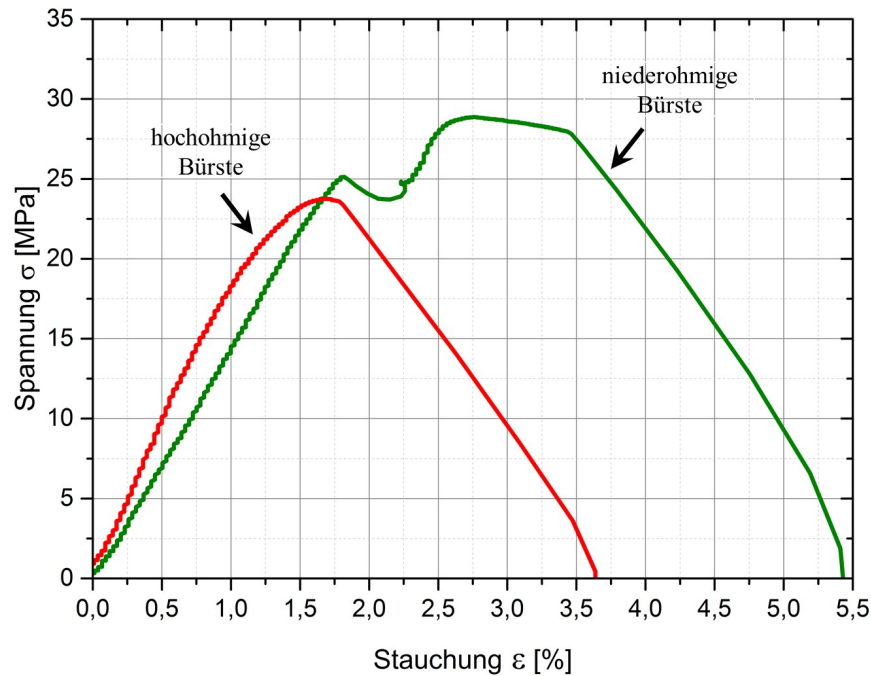


Abbildung 5.3: Nominelle technische Spannungs-Dehnungskurven einer niederohmigen (grün) und einer hochohmigen Kohlebürste (rot).

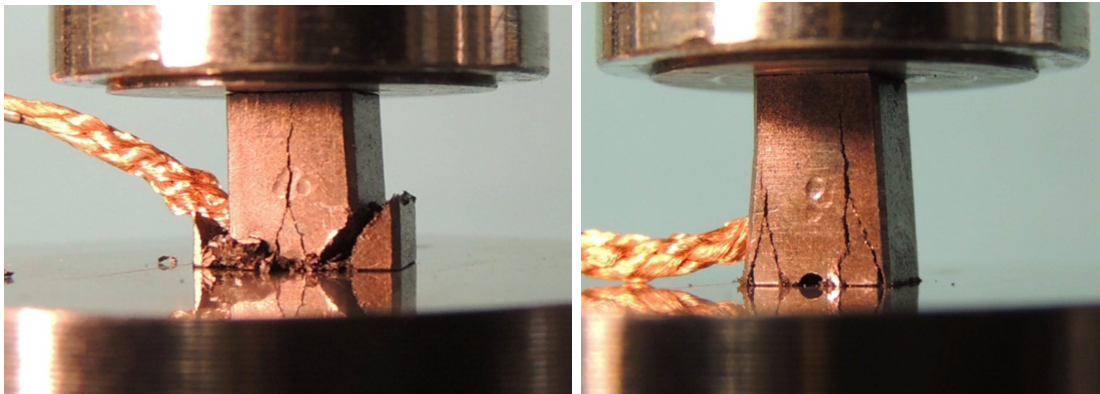


Abbildung 5.4: Versagen einer niederohmigen (links) und einer hochohmigen Kohlebürste (rechts).

5.2.3 Chemische Analyse

Zur Erweiterung der Ergebnisse des Druckversuchs, wurde die chemische Zusammensetzung an der Bruchfläche der hochohmigen Bürste mit XPS untersucht. Die Analyse wurde an der Grenzfläche zwischen einzelnen Sinterkörnern durchgeführt. In Abb. 5.5 ist die Atomkonzentration der, an den Korngrenzen vorhandenen, chemischen Elemente einer niederohmigen,

5 Einfluss der Sintertemperatur auf das Bürstenverhalten

sowie einer hochohmigen Kohlebürste dargestellt. Die chemische Zusammensetzung beider Bürsten teilt sich in die Elemente Kohlenstoff, Kupfer, Sauerstoff, Schwefel, Zink, Molybdän, Calcium und Natrium auf. Diese Elemente sind teilweise auch im Festschmierstoff enthalten, der bei der Bürstenherstellung in kleinen Mengen (ca. 3%) zugesetzt wird.

Die Atomkonzentrationen der Elemente unterscheiden sich an den Bruchflächen der hochohmigen und der niederohmigen Bürsten. Insbesondere weist die hochohmige Bürste eine erhöhte Konzentration der Elemente Sauerstoff, Zink, Schwefel und Kupfer an den Korngrenzen auf.

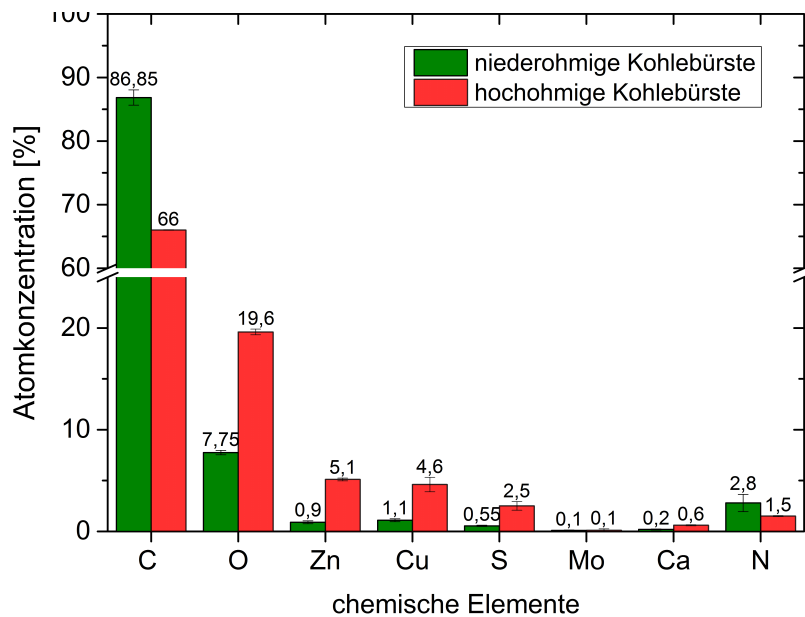


Abbildung 5.5: Chemische Analyse der Elementzusammensetzung, mit XPS an den Korngrenzen einer niederohmigen und einer hochohmigen Kohlebürste gemessen.

Zur vertiefenden Analyse der gefundenen Auffälligkeiten soll im Folgenden ermittelt werden, ob Zink und Kupfer elementar oder als oxidierte Metalle an den Korngrenzen vorliegen. Da die hochohmige Bürste an Luft und nicht im Vakuum gebrochen wurde kann nicht ausgeschlossen werden, dass der erhöhte Sauerstoffgehalt auf eine Oxidation von Zink und Kupfer zurückzuführen ist. Daher wurden sowohl die hochohmige, als auch die niederohmige Bürste im Ultrahochvakuum (UHV) gebrochen und anschließend auf ihre chemische Zusammensetzung an den Korngrenzen mit Augerelektronenspektroskopie (AES) analysiert. Abb. 5.6 und Abb. 5.8 stellen das AES-Elementmapping einer niederohmigen und einer hochohmigen Kohlebürste dar.

An den Korngrenzen der hochohmigen Bürste wurden hohe Zink-, Sauerstoff-, und Schwefelkonzentrationen nachgewiesen. Das Zink kommt dabei als Zinkoxid und Zinksulfid vor. Im Gegensatz dazu liegt Zink an den Korngrenzen der niederohmigen Bürste in geringerer Konzentration vor. Der Schwefel ist auf dem AES-Mapping der niederohmigen Bürste kaum zu identifizieren. Kupfer- und Zink-Mapping zeigen eine überlagernde Verteilung über den gemessenen Bereich. Bei weiterer Vergrößerung des gemessenen Bereichs ist die Überlagerung von Kupfer und Zink in einer niederohmigen Bürste (in Abb. 5.7) besser zu erkennen.

5.2 Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten

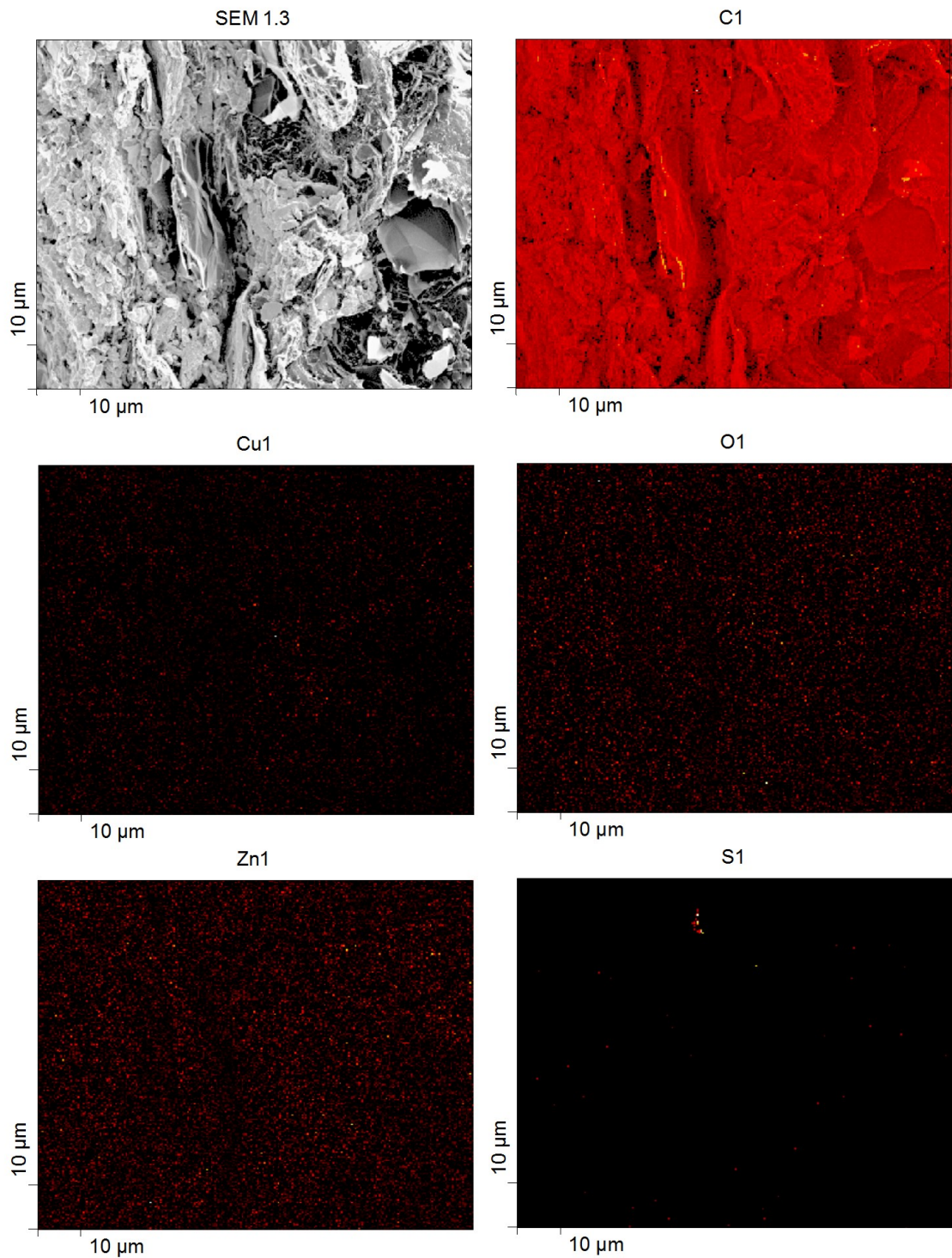


Abbildung 5.6: AES-Elementmapping an den Korngrenzen einer niederohmigen Kohlebürste.

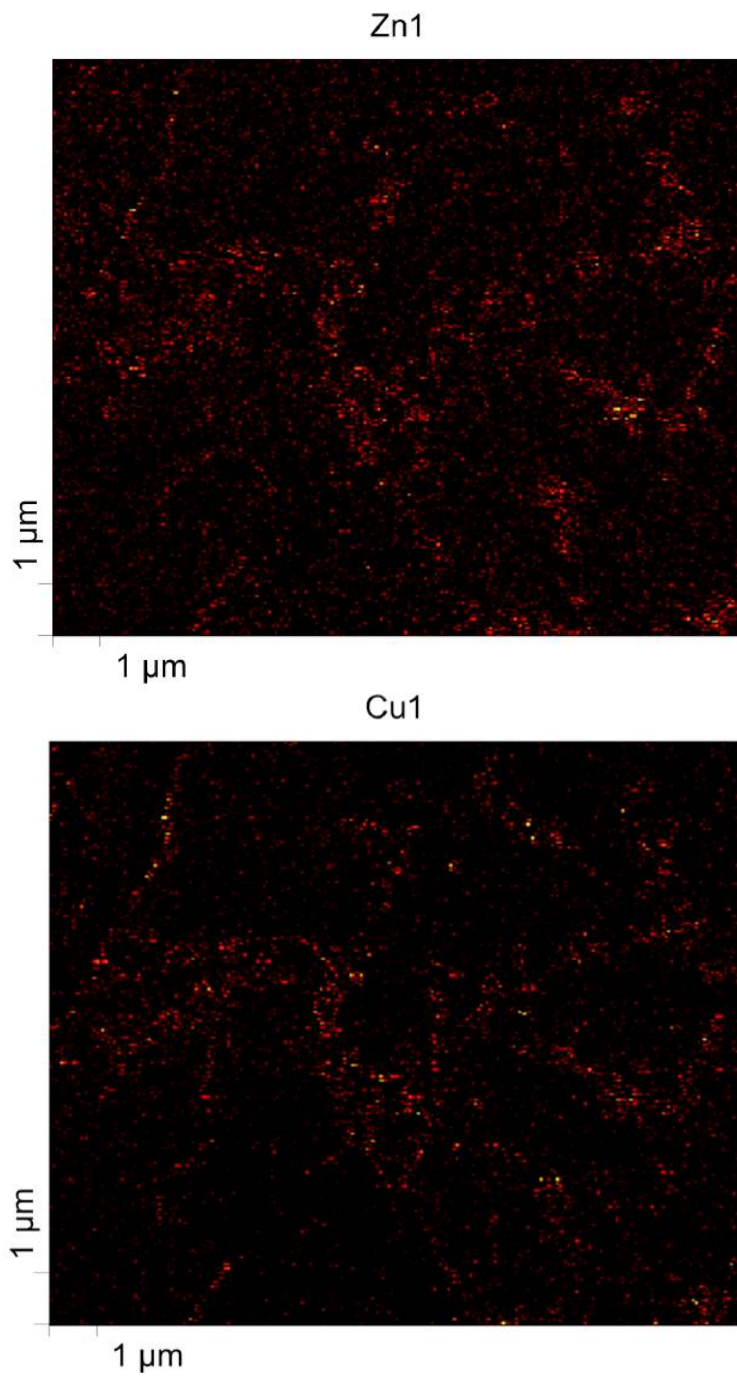


Abbildung 5.7: Korrelation der Kupfer- und Zink-Verteilung in einem vergrößerten Bereich einer niederohmigen Bürste.

5.2 Charakterisierung der fehlerhaften gesinterten Bürsten

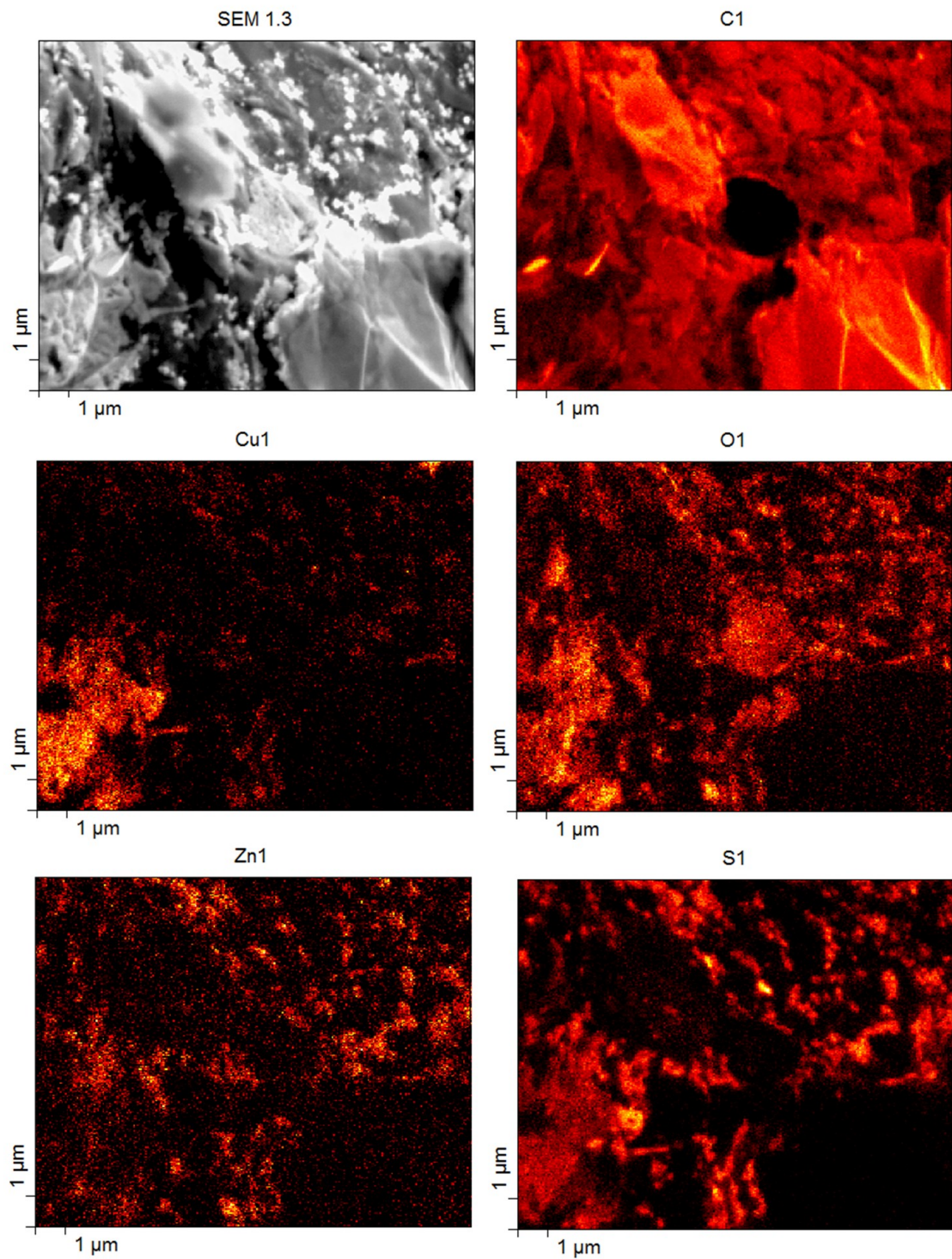


Abbildung 5.8: AES-Elementmapping an den Korngrenzen einer hochohmigen Kohlebürste.

5.2.3.1 Chemische Analyse nach dem wiederholten Sinterprozess

Eine hochohmige Bürste, deren spezifischer Widerstand $37,5 \mu\Omega\text{m}$ beträgt, wurde für 30 Minuten und bei einer Temperatur von 300°C in einem Schutzgasofen aufgeheizt. Nach dem Aufheizen reduzierte sich der spezifische Widerstand von $37,5$ auf $2,5 \mu\Omega\text{m}$ (Abb. 5.9 links). Anschließende XPS Messungen haben an den Korngrenzen (Bruchflächen) eine deutliche Reduzierung der Sauerstoff-, Zink-, Kupfer- und Schwefelkonzentration gezeigt. Die XPS-Analyse vor und nach dem wiederholten Sinterprozess ist in Abb. 5.9 dargestellt. Die Senkung der Elemente wie Zink, Schwefel, Sauerstoff und Molybdän an den Korngrenzen korreliert mit der Reduzierung des spezifischen Widerstands der hochohmigen Bürste nach dem wiederholten Sinterprozess.

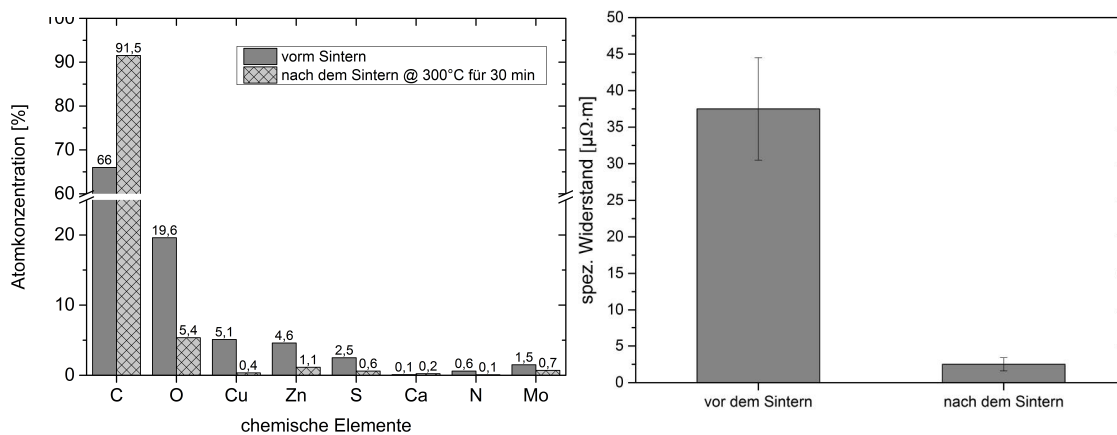


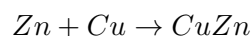
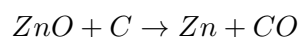
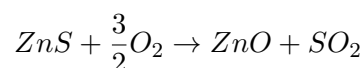
Abbildung 5.9: XPS-Analyse (links) an den Korngrenzen sowie spezifischer Widerstand (rechts) einer hochohmigen Bürste vor und nach dem wiederholten Sinterprozess.

5.3 Diskussion

Während der Messung des elektrischen spezifischen Widerstands der Kohlebürsten wurde festgestellt, dass in einer Charge Kohlebürsten mit hohem und mit niedrigem spezifischem elektrischem Widerstand vorhanden waren. Die Problematik, die zum hohen Bürstenwiderstand geführt hat, könnte während des Mischprozesses aus einer unregelmäßigen Bürstenmaterialmischung, bzw. aus den Fehlstellungen, die während des Sinterprozesses entstanden sind, resultieren. Sollte die Bürstenmaterialmischung die Ursache für die Abweichungen sein, wären alle Kohlebürsten derselben Charge betroffen. Deshalb müssen die zugrundeliegenden Mechanismen der Widerstandsänderung in der Prozessführung gesucht werden. Aus diesem Grund wurden hochohmige Kohlebürsten nachgesintert. Hierdurch reduzierte sich der spezifische Widerstand der fehlerhaften Kohlebürsten markant auf einen niedrigeren Wert von $2,5 \mu\Omega\text{m}$ (siehe Abb. 5.9 rechts). Die dargestellte Analysekette lässt Erkenntnisse über die Einflüsse des Sinterprozesses auf die elektrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften der Kohlebürsten zu. In den folgenden Abschnitten werden die Einflüsse separat betrachtet und diskutiert. Abschließend wird ein Verschleißmodell, verursacht durch einen fehlerhaften Sinterprozess der Kohlebürsten, aufgestellt.

5.3.1 Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die chemischen Eigenschaften der Bürste

Für eine vollständige chemische Reaktion der Bürstenmaterialien ist eine genügend hohe Sintertemperatur erforderlich. Unterschreitet die Temperatur die zur vollständigen chemischen Reaktion benötigte Sintertemperatur, kommt es zu den mangelhaften chemischen Reaktionen zwischen den Bürstenwerkstoffen. Mittels XPS-Analyse wurde festgestellt, dass an der Bruchfläche der fehlerhaften Kohlebürste im Vergleich zur Referenzbürste ein hoher Gehalt an Schwefel, Zink und Sauerstoff vorhanden ist (Abb. 5.5). Die Existenz dieser Elemente ist ein Zeichen für die ungenügende Sintertemperatur zur vollständigen chemischen Reaktionen. Des Weiteren wurde mit AES-Mapping nachgewiesen, dass Zink als Zinkoxid und als Zinksulfid vorkommt (Abb. 5.8). Zinksulfid und Zinkoxid haben halbleitende Eigenschaften und weisen bei Raumtemperatur eine niedrige Leitfähigkeit auf. Im Gegensatz dazu reagiert Zink an den Korngrenzen der niederohmigen Bürste bei ausreichender Temperatur mit Kupfer und wird zu Messing (Abb. 5.7). Messing ist ein guter elektrischer Leiter. Allerdings nimmt seine Leitfähigkeit mit zunehmendem Zinkanteil deutlich ab [91][S. 235]. Der Schwefel ist auf dem AES-Mapping der niederohmigen Bürste kaum nachzuweisen (Abb. 5.6), da er sich bei ausreichender Temperatur vom Zink trennt und anschließend in einem gasförmigen Zustand die Korngrenzen verlässt. Hingegen können sich bei den fehlerhaften Bürsten, aufgrund der ausreichenden Menge an Schwefel, Kupfersulfide bilden. Die chemischen Reaktionen der Materialzusätze bei ausreichender Sintertemperatur können wie folgt ablaufen:



5.3.2 Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die mechanischen Eigenschaften der Bürste

Die fehlerhaften Kohlebürsten zeigten im Druckversuch eine deutlich niedrigere Festigkeit im Vergleich zu den fehlerfreien Kohlebürsten (Abb. 5.3). Die Festigkeit der fehlerhaften Kohlebürste lag um 18%, niedriger als die Festigkeit der niederohmigen Bürste. Die niedrige Festigkeit der fehlerhaften Kohlebürste beruht auf dem begrenzten Wachstum der Kontaktfläche zwischen den Körnern. Es kann nicht zur vollständigen Bildung der Korngrenzen zwischen den Körnern kommen. Ein unvollständiges Wachstum der Korngrenzen trägt zur Porosität der Bürste bei. Poröse Kontaktstücke führen zu fehlerhaften Leitmechanismen in elektrischen Kontakten. Die Poren weisen eine Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Feuchte auf, insbesondere Schwefeldioxid, welches in der Atmosphäre enthalten ist. Dabei können Kohlenstoffatome für chemische Reaktionen aktiviert und werden von den Gasen angegriffen. Als Folge verschlechtern sich die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der angegriffenen Stellen. Des Weiteren kann der hohe Gasgehalt zum hohen Abbrand bei der Entstehung der Lichtbögen führen [92].

Eine niedrige Festigkeit der Kohlebürste trägt zum hohen mechanischen Verschleiß bei (Abb. 5.1 c). Aufgrund der niedrigen Korngrenzenenergie kommt es bei tribologischen Belastungen zum leichten Brechen der Körner und somit zum hohen Bürstenverschleiß.

5.3.3 Einfluss des fehlerhaften Sinterns auf die elektrischen Eigenschaften der Bürste

Aus den KBP-Versuchen und der Wirbelstrommessung wurde eine Korrelation zwischen dem hohen spezifischen elektrischen Widerstand und dem Spannungsabfall der fehlerhaften Kohlebürsten festgestellt (Abb. 5.1 a). Dabei nahm der Spannungsabfall mit ansteigendem Bürstenwiderstand zu. Basierend auf der niedrigen Festigkeit der fehlerhaften Kohlebürsten, die durch unvollständiges Wachstum der Korngrenzen erklärt wurde, reduzieren sich die Übergangsflächen von einem Korn zum anderen. Dadurch engen sich die Stromlinien durch die leitenden Stellen ein und das führt zur lokalen Erwärmung der Bürste. Eine weitere Erklärung für den hohen Widerstand der fehlerhaften Kohlebürsten ist durch die Lagerung der Fremdmaterialien, wie Zinkoxid und Zinksulfid, an den Korngrenzen begründet (Abb. 5.8). Dabei führt es zur weiteren Verringerung der elektrischen Leitstellen zwischen den Körnern, da die angelagerten Materialien einen hohen elektrischen Widerstand aufweisen. Infolgedessen erwärmt sich der Bürstenkörper aufgrund der elektrischen Verluste und zeigt einen hohen Temperaturwert, der oberhalb der Siedetemperatur von Wasser liegt (Abb. 5.1 b). Die Wasserschicht entsteht auf der Kommutatoroberfläche aufgrund der Kopplung der OH-Gruppen an die Sauerstoffatome der Kupferoxidschicht. Die Wasserschicht trennt die realen Kontaktflächen im elastischen Bereich und führt zur Verringerung der Reibung der Kontaktpartner. Übersteigt die Kontakttemperatur die Siedetemperatur des Wassers, verdampft dadurch auf der einen Seite die vorhandene Wasserschicht, auf der anderen Seite wird das Wachstum der Fremdschicht im Kontakt durch zunehmende chemische Reaktionen beschleunigt. In beiden Fällen nimmt der Bürstenverschleiß zu (Abb. 5.1).

5.3.4 Korrelation zwischen den Einflussgrößen

Der fehlerhaft Sinterprozess der Kohlebürsten beeinträchtigt ihre chemischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften. In Abb. 5.10 ist ein Flussdiagramm zum auftretenden Verschleißprozess der fehlerhaften gesinterten Kohlebürste dargestellt.

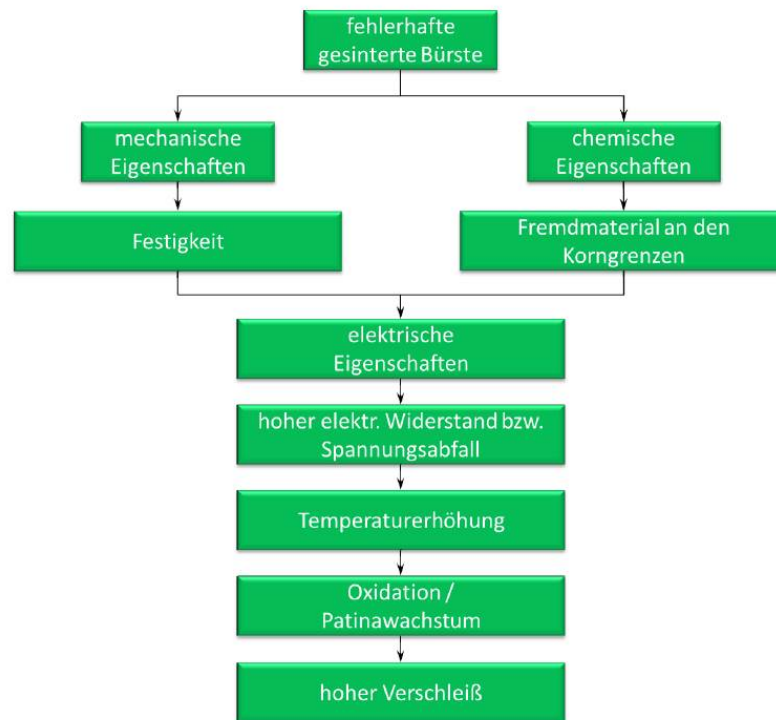


Abbildung 5.10: Flussdiagramm zum auftretenden Verschleißprozess der fehlerhaft gesinterten Kohlebürste.

Die dargestellte Analyseketten lässt die Aussage zu, dass die Temperaturverteilung im Schutzgasofen diesen Effekt verursachen kann. Ein unzureichender Temperaturverlauf führt zur unvollständigen Verdichtung, bzw. zur Porosität des Bürstenkörpers. Dadurch verringert sich die Festigkeit der fehlerhaft gesinterten Bürsten (Abb. 5.3). Des Weiteren führt der Wärmemangel zu unvollständigen chemischen Reaktionen in der Bürste, insbesondere an den Korngrenzen der gelagerten Fremdmaterialien. Die niedrige Festigkeit der Kohlebürste, sowie die Anreicherung der Fremdmaterialien (Abb. 5.8) an den Korngrenzen beeinträchtigen die elektrischen Eigenschaften der Kohlebürsten. Hierbei erhöht sich der elektrische Widerstand der Kohlebürste und somit der Spannungsabfall im leitenden Fall. Infolgedessen erwärmt sich die Bürste an den lokalen hochohmigen Stellen. Es entstehen sogenannte *Hot-Spots*. An diesen Stellen oxidiert das Graphit, wenn die Stromverlustwärme die Oxidationstemperatur des Graphits (größer 500 °C) erreicht [93]. Der in der Bürste entstandene Wärmeverlust muss aufgrund des Temperaturgradienten in das Kupfer abgeleitet werden. Hierbei erwärmt sich der Kontakt. Die Erwärmung des Kontakts führt zum beschleunigten Patinawachstum, sowie zur Verdampfung der Wasserschicht, wenn die Kontakttemperatur die Siedetemperatur des Wassers überschreitet. Die oben genannten Aspekte führen zum hohen Bürstenverschleiß.

5 Einfluss der Sintertemperatur auf das Bürstenverhalten

Basierend auf den oben beschriebenen Ergebnissen können zwei unterschiedliche Hypothesen, die den hohen elektrischen Widerstand der Bürste verursachen, gebildet werden:

Hypothese A:

Die Anreicherung von Fremdatomen an den Korngrenzen der hochohmigen Bürste führt zur schlechten elektrischen Leitfähigkeit der Bürste. Fremdatome und Oxide (Zinkoxid, Zinksulfid und Kupferoxid) bilden an den Korngrenzen des Graphits Bereiche mit hohem Widerstand. Diese reduzieren die Elektronenbewegung, d.h. die Leitfähigkeit der Bürste. Sintern mit ausreichender Temperatur, bzw. das Nachtempern führt zur Umwandlung von ZnO und CuO zu Messing (CuZn), das eine gute elektrische Leitfähigkeit besitzt.

Hypothese B:

Aufgrund der zu geringer Sintertemperatur kommt es nicht zur gründlichen Verbindung der Kupferpartikel. Somit wird die Elektronenbewegung aufgrund des begrenzten Kornwachstums der Pulverkörner verhindert. Dadurch nimmt die Porosität der Bürste zu. Da die Porosität einen Einfluss auf die Dichte des Materials, bzw. auf die Festigkeit hat, kann dies zu kleinen Rissen und zum Bruch der Bürste führen.

In einem Schlüsselversuch wurde ermittelt, ob eine der obengenannten Hypothesen allein für die schlechten Kontakt- und Verschleißigenschaften verantwortlich ist, oder eine Kombination aus beiden Hypothesen in Frage kommt. Dafür wurden Bürsten mit und ohne Materialzusätze (Zink und Schwefel) bei nicht ausreichender Temperatur gesintert. Anschließend wurden diese Bürsten auf ihren spezifischen Widerstand hin untersucht (siehe Abb. 5.11). Die Bürsten ohne Zink und ohne Schwefel hatten einen hohen spezifischen Widerstand. Der gemittelte Widerstand von jeweils 20 Kohlebürsten lag bei den Bürsten ohne Materialzusätze bei $12,8 \mu\Omega\text{m}$ und bei den Bürsten mit Materialzusätzen bei $14,1 \mu\Omega\text{m}$. Durch den geringen Unterschied lässt sich ableiten, dass nicht nur die Existenz der Materialzusätze an den Korngrenzen für die Änderung der Leitfähigkeit nach erstmaligem Sintern verantwortlich sein kann.

Da die Bürste mit Materialzusätzen einen höheren spezifischen Widerstand im Vergleich zur Bürste ohne Materialzusätze zeigt, haben die Materialzusätze einen untergeordneten Einfluss auf den spezifischen Widerstand. Die untersuchten Bürsten, die spezifische Widerstände von bis zu $120 \mu\Omega\text{m}$ aufwiesen, legen jedoch nahe, dass mit einem zunehmenden Anteil an Materialzusätzen der Widerstand zunimmt.

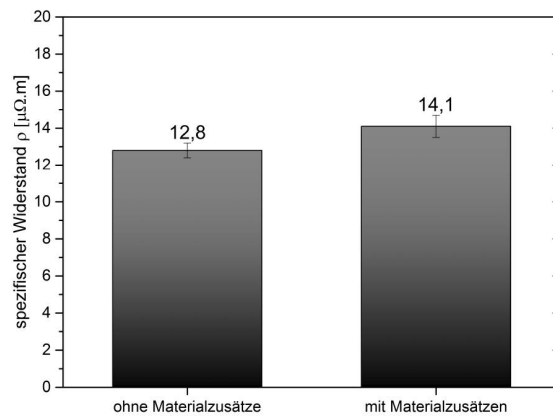


Abbildung 5.11: Widerstandsvergleiche von Bürsten mit und ohne Materialzusätze bei nicht ausreichender Sintertemperatur.

5.4 Kurzzusammenfassung

Bei der Untersuchung der gesinterten Kohlebürsten am Kohlebürstenprüfstand KBP zeigten einige einen hohen Spannungsabfall, hohe Temperaturen und einen hohen Verschleiß. Durch die Widerstandsmessung der Kohlebürste mit Wirbelstrommessung wurde nachgewiesen, dass die fehlerhaften Bürsten einen hohen Widerstand aufwiesen. Zur Charakterisierung dieser Bürsten wurden ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften bestimmt. Es wurde gemessen, dass die Festigkeit der hochohmigen Bürste deutlich niedriger, als die Festigkeit der niederohmigen Bürste ist. Die chemische Zusammensetzung beider Bürsten teilt sich auf in Kohlenstoff, Kupfer, Sauerstoff, Schwefel, Zink, Molybdän, Kalzium und Fluorid. Die Atomkonzentrationen der Elemente unterschieden sich deutlich an den Bruchflächen der hochohmigen und der niederohmigen Bürsten. Vor allem weist die hochohmige Bürste eine erhöhte Konzentration der Elemente Sauerstoff, Zink, Schwefel und Kupfer an den Korngrenzen auf. Mittels AES-Mapping wurde nachgewiesen, dass das Zink als Zinkoxid und Zinksulfid vorkommt. Im Gegensatz dazu reagiert Zink an den Korngrenzen der niederohmigen Bürste bei ausreichender Temperatur mit Kupfer und wird zu Messing. Der Schwefel war auf dem AES-Mapping der niederohmigen Bürste kaum zu erkennen, da er sich bei ausreichender Temperatur vom Zink trennte und anschließend in einem gasförmigen Zustand die Korngrenzen verließ. Durch Nachsintern der hochohmigen Bürsten ließ sich sowohl der spezifische elektrische Widerstand, als auch der Gehalt der Fremdelemente an den Korngrenzen reduzieren. Schließlich wurden zwei Hypothesen, die die Ursache des hohen Bürstenwiderstands beschreiben, aufgestellt. Eine Hypothese besagt, dass die Anlagerung der Fremdmaterialien an den Korngrenzen den hohen Bürstenwiderstand verursacht. Wobei die andere Hypothese auf die nicht gründliche Verbindung der Kupferpartikel beruht. Um die Hypothesen zu bewerten, wurden Kohlebürsten mit und ohne Materialzusätze bei ungenügender Temperatur gesintert. Anschließend wurde der spezifische elektrische Widerstand der Kohlebürsten gemessen. Beide Bürstenvarianten zeigten einen hohen Widerstand. Jedoch war der Widerstand der Bürste ohne Materialzusätze um $1,3 \mu\Omega\text{m}$ geringer, als die Bürsten mit Materialzusätzen. Daraus resultiert, dass Hypothese B dominiert und Hypothese A einen untergeordneten Einfluss auf den spezifischen Widerstand haben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgelegten Arbeit wurden die elektrischen und mechanischen Einflüsse auf das tribologische System Kohlebürste-Kommutator eines Gleichstrommotors untersucht. Dabei wurden drei verschiedene Themengebiete, die Einflüsse auf die Reibung und den Verschleiß des Tribosystems haben, ausführlich behandelt. Zum einen wurde der Einfluss der Pressrichtung der Kohlebürsten auf das Verhalten des Tribosystems untersucht. In einem weiteren Kapitel konnte die Wirkung eines geschmierten Kohlebürste-Kommutator-Kontakts und dessen Einfluss auf den Verschleiß des Tribosystems herausgestellt werden. Im letzten Kapitel wurde der Einfluss der Sintertemperatur auf die Eigenschaften der Kohlebürsten bestimmt.

Im ersten Teil der Arbeit wurde der Einfluss der Pressrichtung der Kohlebürsten auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Reibkontakts ausführlich untersucht. Mithilfe stromloser Reibversuche konnte festgestellt werden, dass die Materialorientierung der Kohlebürste unabhängig von der Pressrichtung eine Verformung parallel zur Kontaktfläche zeigt. Die radial gepressten Bürsten wiesen dabei gute Reibeigenschaften durch die leichtere Abscherung der Graphitebenen auf. Im Gegensatz dazu konnte der hohe Reibwert von tangential gepressten Bürsten auf die energieintensive Deformation der Graphitebenen an der Reibfläche zurückgeführt werden. Des Weiteren konnte korrespondierend die höchste Reibungstemperatur bei der tangentialen Bürste gemessen werden. Die Pressrichtung zeigte bei den Versuchen auch einen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Bürste. Die axial und tangential gepressten Bürsten wiesen infolge der Kupferorientierung einen niedrigen Längswiderstand, sowie einen hohen Querwiderstand auf. Im Gegensatz dazu war bei der radial gepressten Bürste der Querwiderstand niedriger, als der Längswiderstand. Diese Eigenschaften verursachten einen höheren Spannungsabfall, sowie eine höhere Temperatur der radialen Bürste, welche auf Ohm'sche Verluste zurückzuführen ist. Bei den bestromten Versuchen mit Kommutierung wurden im Gegensatz zum stromlosen Fall die Kommutatorlamellen stärker beansprucht. Der Verschleiß des Systems hat sich aufgrund der Kommutierungsbeanspruchung erhöht. Die Kommutatorlamellen zeigten dabei an den ablaufenden Lamellenkanten eine Verschleißzone, die durch Lichtbögen und Kupferschmelze erzeugt wurde. Der Verschleiß ist in diesem Bereich höher, als an den auflaufenden Kommutatorlamellen. Als Folge kommt es zu einer Kontakttrennung an der ablaufenden Kante, die zusätzliche Lichtbögen verursacht, welche wiederum hohe Verschleißwerte generieren. Zur Verbesserung des gemessenen Verschleißverhaltens wurde ein Lösungsansatz durch die Festigkeitssteigerung des Kupfers gewählt. Die Kommutatoroberfläche wurde dazu mit Wolframcarbid und variierten Prozessparametern bestrahlt. Eine resultierende Festigkeitssteigerung wurde durch einen FIB-Schnitt durch die Abbildung der Kornverfeinerung belegt werden, welche nach der Hall-Petch-Beziehung in der Verfestigung resultiert. Zur Überprüfung der Optimierung konnte durch Dauerlaufversuche am E-Motor mit bestrahlter Kommutatoroberfläche gezeigt werden, dass sich sowohl der Kommutator-, als auch der Bürstenverschleiß durch die Vorbehandlung reduzieren lassen. Die vorherigen Unterschiede von auflaufender und ablaufender Kante der Kommutatorlamellen wurden durch diesen Prozessschritt egalisiert.

Zur Berechnung vorherrschender Kontakttemperaturen wurde in dieser Arbeit ein Modell nach HOLM und SCHOBERT angewandt und durch eine Betrachtung der Materialorientierung der Kohlenbürste erweitert. In diesem Modell wurde zunächst die maximale Temperatur anhand eines Ellipsoidmodells für einen ruhenden Kontakt berechnet. Anschließend wurde der Einfluss der Rotation betrachtet. Die Reibungswärme im Kontakt wurde berechnet. Diese ist von der Größe der mechanischen Kontaktfläche, der Geschwindigkeit, sowie vom Reibungskoeffizienten abhängig. Die Temperatur der Kontaktfläche wurde sowohl für den elastischen als auch für den plastischen Fall betrachtet. Die zeitabhängige Temperatur, die durch den elektrischen Strom verursacht wird, sowie die Reibungstemperatur wurden zur Berechnung der Endtemperatur im Kontakt berücksichtigt. Die Berechnung der Reibungstemperatur zeigte, dass die Erwärmung des Kontakts von der Materialausrichtung abhängig ist. Die Modellberechnungen wiesen die höchste Reibungstemperatur in der tangentialen Reibfläche und die niedrigste in der radialen Reibfläche auf. Des Weiteren waren die gemessenen Kontaktspannungen und Kontaktströme für die Abschätzung der Kontakttemperatur im elektrisch leitenden Zustand essentiell. Es zeigte sich, dass die Modellrechnung die höchste Kontakttemperatur bei der radial gepressten Bürste und die niedrigste Kontakttemperatur bei der axialen Bürste ergibt. Die Anordnung der Modellberechnungen zeigte eine Übereinstimmung mit den experimentellen Resultaten. Weiterhin zeigt der Vergleich zwischen elastischem und plastischem Kontaktfall, dass die Wärmefreisetzung in einem elastischen Kontakt höher ist, als im plastischen Kontakt. Dieser Effekt beruht auf den berechneten realen Kontaktflächen. Abhängig von den Eingangsparametern ist die reale Kontaktfläche im elastischen Kontakt kleiner als im plastischen Kontakt. Erhöht sich die Kontaktfläche zwischen den Kontaktpartnern wird mehr Wärme aus der Kontaktfläche abgeleitet.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wurde die Wirksamkeit der Schmierung des Reibkontakts von bürstenbehafteten Gleichstrommotoren untersucht. Dabei wurden sowohl Grundöle, als auch additivierte Öle mit hohem und niedrigem spezifischen Widerstand als Schmiermittel eingesetzt. Das leitende Schmieröl enthält dabei eine ionische Flüssigkeit. Die Schmierung mit leitendem Öl führte zum schnelleren Einlauf des Tribosystems mit niedrigen stabilen Reibwerten. Im Gegensatz dazu zeigten die Versuche mit schlecht leitendem Öl eine längere Einlaufzeit, sowie hohe Reibwerte. Des Weiteren traten bei schlecht leitendem Öl Lichtbögen zwischen den Kontakten auf. Der analysierte Kommutator dieser Versuche wies im Gegensatz zum leitenden Öl einen zehnfach erhöhten Verschleißwert auf. Zur Erklärung der Effekte wurde ein Verschleißmodell aufgestellt. Das Modell kombiniert den Zusammenhang zwischen den tribologischen Ergebnissen und den Resultaten der durchgeführten analytischen Verfahren zu einer phänomenologischen Argumentationskette.

Das dritte Thema dieser Arbeit behandelt den Einfluss der Sintertemperatur auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kohlebürsten. Bei der Untersuchung von gesinterten Kohlebürsten am Kohlebürstenprüfstand zeigten einige vereinzelte Bürsten einen hohen Spannungsabfall, hohe Temperaturen und einen hohen Verschleiß. Durch die Widerstandsmessung der Kohlebürste mit Wirbelstrommessung wurde nachgewiesen, dass die fehlerhaften Bürsten einen hohen Widerstand aufweisen. Zur Charakterisierung dieser Bürsten wurden ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Festigkeit der hochohmigen Bürste deutlich niedriger liegt, als die Festigkeit der niederohmigen Bürste. Durch XPS-Analyse der elementaren Zusammensetzung konnten markante Unterschiede zwischen beiden Typen festgestellt werden. Insbesondere unterschieden sich die Konzentrationen an den Bruchflächen der hochohmigen und der niederohmigen

Bürsten. Vor allem wies die hochohmige Bürste eine erhöhte Konzentration der Elemente Sauerstoff, Zink, Schwefel und Kupfer an den Korngrenzen auf. Durch Nachsintern der hochohmigen Bürsten ließ sich sowohl der spezifische elektrische Widerstand, als auch der Gehalt der Fremdelemente an den Korngrenzen reduzieren. Schließlich wurden zwei Hypothesen zur Klärung der Ursache des hohen Bürstenwiderstands aufgestellt. Eine Hypothese besagt, dass die Anlagerung der Fremdmaterialien an den Korngrenzen den hohen Bürstenwiderstand verursachte. Die zweite Hypothese beruht auf der Annahme, dass die unzureichende Verbindung der Kupferpartikel während des Sinterprozesses verantwortlich ist. Um die Hypothesen zu bewerten, wurden Kohlebürsten mit und ohne Materialzusätze bei ungenügender Temperatur gesintert. Anschließend wurde der spezifische elektrische Widerstand der Kohlebürsten gemessen. Beide Bürstenvarianten zeigten einen hohen Widerstand. Jedoch war der Widerstand der Bürsten ohne Materialzusätze geringer, als die Bürsten mit Materialzusätzen. Aus diesem Stichversuch resultiert, dass die zweite Hypothese dominiert und die Materialzusätze einen untergeordneten Einfluss auf den spezifischen Widerstand haben.

Die vorgestellten Ergebnisse dieser Arbeit und die Diskussion dieser haben ein großes Potential an Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Im ersten Kapitel wurde der Einfluss der Materialorientierung durch die Variation der Pressrichtung analysiert. Eine Optimierungsmöglichkeit liegt dabei in der Verwendung des Typs „Axial“, da hierbei kleinste Reib-, Verschleiß- und Temperaturwerte detektiert werden konnten. Es ist denkbar, dass bei dieser Thematik die weiterführende Analyse des Prozessschritts „Pressen“ erneute Optimierungsmöglichkeiten hervorbringt. Bei der Betrachtung des geschmierten Kontaktfalls konnte eine Verschleißminimierung durch Verwendung eines leitfähigen Öls erzielt werden. Bei Einsatzfällen mit Ölkontamination sollte folglich ein Schmierstoff mit ionischer Flüssigkeit verbessert werden, um eine lange Laufzeit des Elektromotors garantieren zu können. Großes Potential bei dieser Thematik wird in der Variation der Konzentration zugesetzter ionischer Flüssigkeiten angesetzt. Beim dritten Themengebiet dieser Arbeit, dem Einfluss des Sinterprozesses auf das Reibungs- und Verschleißverhalten, konnte durch einen gezielten Stichprobe die Wirkung von Zuschlagsstoffen als geringfügig eingestuft werden. Die Verbindung der Kupferpartikel zu einer leitfähigen Bürste ist essentiell zur Optimierung des Tribosystems einzuordnen. Die geschickte Temperaturführung erscheint dominant zur Schaffung von verschleißarmen Kohlebürsten.

Weiteres Vorgehen

Zur Überprüfung der formulierten Optimierungsmöglichkeiten sollen an dieser Stelle Vorschläge für die Variation notwendiger Stichversuche gegeben werden. Zur weiteren Analyse der Wirkung einer Vorzugsrichtung des Graphits aufgrund des Pressvorgangs sollten Kohlebürsten ohne Kupferzusätze hergestellt werden. Der tribologische Effekt könnte somit ohne eine Verzerrung durch den Kupferanteil ermittelt werden. Bisher wurden die Bürsten mit unterschiedlichen Pressungen bei einem Stromwert und einer Drehzahl getestet. Für weitere Versuche sollen die Kohlebürsten verschiedener Pressung mit Variation der Normalkraft, der Drehzahl, sowie der Stromstärke geprüft werden, um die optimale Pressrichtung bei verschiedenen Betriebspunkten zu bestätigen. Die Wirkung von leitfähigen Schmierstoffen sollte durch eine Konzentrationsvariation der ionischen Flüssigkeit im Schmierstoff verdeutlicht werden. Die notwendigen Versuche sollten dabei zusätzlich bei unterschiedlichen Bestromungsparametern durchgeführt werden, da die erwarteten Effekte von der Änderung der

6 Zusammenfassung und Ausblick

Leitfähigkeit des Zwischenmediums abhängen. In Kooperation mit einem Bürstenhersteller könnte des Weiteren eine Optimierung des Sinterprozesses angestrebt werden, bei dem die Wirkung des Temperaturprofils auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Kohlebürste durch tribologische Versuche bestätigt und optimiert werden kann. Eine verbesserte Verbindung der Kupferpartikel beim Sintern resultiert hierbei in einer gesteigerten Leitfähigkeit des Produkts mit den beschriebenen tribologischen Vorteilen bei der Anwendung.

Literaturverzeichnis

- [1] Elektroindustrie in Zahlen; Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, 2015. URL <http://www.zvei.org>.
- [2] SEIDL, M. Feldorientierte Steuerung von Elektroantrieben in Fahrzeugen. URL <http://www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/artikel/103408/>.
- [3] PLASSMANN, W.; SCHULZ, D. Handbuch Elektrotechnik. Vieweg + Teubner, 2009.
- [4] BOLTE, E. Elektrische Maschinen. Springer, 2012.
- [5] SCHUISKY, W. Elektromotoren: Ihre Eigenschaften und ihre Verwendung für Antriebe. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [6] FISCHER, R. Elektrische Maschinen. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2013.
- [7] SPRATLER, C. Einflussgrößen und Vorhersagbarkeit der elektromagnetischen Störaussendung von Gleichstrommotoren. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [8] HEIDRICH, T. Kommutierungsberechnung bei permanentmagneterregten Kommutatormotoren kleiner Leistung. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2012.
- [9] KRÜGER, A. Carbon Materials and Nanotechnology. John Wiley & Sons, 2010.
- [10] WISSERT, R. Thermoplastische Nanokomposite auf der Basis von Panzerlatex, funktionalisierten Graphenen und Graphitoxid. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2009.
- [11] VINARICKY, E., (Hg.) Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [12] Mersen; Herstellung von Graphit, 2015. URL <http://www.ellor.de/herstellung-von-graphit.html>.
- [13] PINTSCHER, F. Kontakt zwischen Fahrdrat und Schleifleiste. 18. *Albert-Keil-Kontaktseminar* 2005. (D):S. 101–110.
- [14] SCHWAB, R. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim, 1. Aufl., 2011.
- [15] NISHIYAMA, Z. Über den elektrischen Widerstand des Kohlenstoffs. *Zeitschrift für Physik* 1931. 71(3):S. 600–615.
- [16] BLUTHARDT, C. Prozessverbesserungsmaßnahmen zur Herstellung von Elektrographitkohlen und Möglichkeiten zur messtechnischen Validierung. *Robert Bosch GmbH* 2012:S. 1–17.
- [17] GROTE, K.H.; FELDHOUSEN, J. Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer, 22. Aufl., 2001.
- [18] BRYANT, M.D.; TEWARI, A.; LIN, J.W. Wear Rate Reductions in Carbon Brushes Conducting Current, and Sliding Against Wavy Copper Surfaces. *IEEE Transactions on Components, Packaging And Technology* 1995. 18(2):S. 375–381.

- [19] LANCASTER, J.K.; STANLEY, I.W. The effect of current on the friction of carbon brush materials. *British Journal of Applied Physics* 1964. 29:S. 29–41.
- [20] WITZAK, M.P. Verbesserung der Prozeßführungssysteme für funkenerosive Senkanlagen unter Einbeziehung von Fuzzy-Technologien. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1997.
- [21] Deutsches Kupferinstitut; Cu-OFE Werkstoff-Datenblätter, 2005. URL <https://www.kupferinstitut.de>.
- [22] HAMILTON, R.J. DC Motor Brush Life. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* 2000. 36(6):S. 1682–1687.
- [23] FAKIH, B. Charakterisierung von Reibkontakten in Elektromotoren. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- [24] FAKIH, B.; DIENWIEBEL, M. The structure of tribolayers at the commutator and brush interface: A case study of failed and non-failed DC motors. *Tribology International* 2015. 92:S. 21–28.
- [25] KONCHITS, V.V.; BRAUNOVIC, M.; MYSHKIN, N.K. Fundamentals of Electrical Contacts. CRC Press, 2006.
- [26] THOMSON, J.E. A review of work at the Nelson Research Laboratories on current transfer and commutation in electrical Machines. *2nd International Symposium on Electric Contact Phenomena, Graz (Austria)* 1964. May 4-6:S. 424–436.
- [27] HOLM, E. Contribution to the Theory of the Contact between a Carbon Brush and a Copper Collector Ring. *Journal of Applied Physics* 1957. 28(10):S. 1171.
- [28] SCHRÖTER, F. Zur Theorie des Stromüberganges bei Schleifkontakten. *Elektrotechnische Zeitschrift* 1958. Ausgabe A(H. 14):S. 498 – 501.
- [29] SENOUCI, A.; FRENE, J.; ZAIDI, H. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. *Wear* 1999. 225-229:S. 949–953.
- [30] HU, Z.; CHEN, Z.; XIA, J. Study on surface film in the wear of electrographite brushes against copper commutators for variable current and humidity. *Wear* 2008. 264(1-2):S. 11–17.
- [31] ZHONG-LIANG, H.U.; ZHEN-HUA, C. Wear property of high-resistivity carbon brushes made with and without MoS₂ in variable humidity. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2007. 18:S. 340–345.
- [32] FESER, T. Untersuchungen zum Einlaufverhalten binärer α -Messinglegierungen unter Ölschmierung in Abhängigkeit des Zinkgehaltes. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.
- [33] CAMPBELL, W. The Lubrication of Electrical Contacts. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, HYBRIDS AND MANUFACTURING TECHNOLOGY* 1978. (CHMT-1):S. 4–16.
- [34] BOWDEN, F.P.; TABOR, D. Friction and Lubrication of Solids. *Clarendon Press, Oxford* 1986.
- [35] FASCHING, G. Werkstoffe für die Elektrotechnik. Springer Wien NewYork, 4. Aufl., 2005.
- [36] KUNICKE, C. Der Einfluss der Kollektortemperatur auf das Laufverhalten von Kohlebürsten. *5. internationalen Tagung über elektrische Kontakte* 1970:S. 257–260.

- [37] WIESSLER, U. Kupfer-, Kohle-, Gleitkontakte: Topographie, chemische Oberflächenstruktur und Korrelation mit Kohlebürsten-Laufparametern. *International Conference on Electric Contact Phenomena* 1982:S. 2–5.
- [38] YASAR, I.; CANAKCI, A.; ARSLAN, F. The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current. *Tribology International* 2007. 40(9):S. 1381–1386.
- [39] AZIZ, M.M.A.; KHORSHID, S.A.Y.; ELZAHAB, E.E.M.A. Effect of Combined Velocity and Pressure on Life Time of Carbon Brushes. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2000. 15(2):S. 176–180.
- [40] SAVAGE, D.E.; LAGALLY, M.G.; SCHRADER, M.E. Electron Spectroscopy analysis of contact surfaces in the wear of carbon brushes against commutators 1981. 7:S. 142–155.
- [41] TAMAI, T. Recovery of Low Contact Resistance due to Electrical and Mechanical Breakdown of Contact Films. *The Ragnar Holm Scientific Achievement Award. 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston (SC), USA* 2010.
- [42] SAWA, K.; LIQING, L.; UENO, T. Influence of Arc Discharge on Carbon Commutator and Brush Wear in DC Motor Driving Fuel Pump. *Electrical Contacts (HOLM), 2012 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on* 2012.
- [43] BERGER, F. Der Störlichtbögen: Ein Überblick. *20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe (D)* 2009.
- [44] STRECK, M.; EPPLER, O.; NOTHNAGEL, F.; BERGER, F. Dynamisches Lichtbogenverhalten von selbst- und fremderregten Schwingungsvorgängen. *Albert-Keil-Kontaktseminar* 2013:S. 205–215.
- [45] ERK, A.; SCHMELZLE, M. Grundlagen der Schaltgerätetechnik. Springer Berlin Heidelberg, 1974.
- [46] RÜTHER, T. Experimentelle Untersuchung der Lichtbogenaufteilung an Löschblechen. Cuvillier Verlag Göttingen, 1. Aufl., 2008.
- [47] DABRINGHAUSEN, L. Charakterisierung von Elektroden für Hochdruck-Plasmalampen durch Pyrometrie und Simulation. TENEA Verlag für Medien, 2004.
- [48] SHOBERT, E. Sliding Electrical Contacts (Graphite Type Lubrication). *Marcel Dekker, New York* 1999:S. 839 – 872.
- [49] SLADE, P.G. Sliding Electrical Contacts. CRC Press, New York, 2. Aufl., 2014.
- [50] KOHLRAUSCH, F. Über den stationären Temperaturzustand eines elektrisch geheizten Leiters. *Annalen der Physik* 1900. 306(1):S. 132.
- [51] HOLM, R. Electric Contacts. Springer, 4. Aufl., 1967.
- [52] SHOBERT, E.I. Carbon Brushes: The Physics and Chemistry of Sliding Contacts. New York: Chemical Publishing Co., 1965.
- [53] PINTSCHER, F. Kontaktvorgänge und Verschleißverhalten des Systems Fahrdraht-Schleifleiste. Dissertation, Technischen Universität Dresden, 2003.
- [54] POPOV, V.L. Kontaktmechanik und Reibung - Von der Nanotribologie bis zur Erdbendynamik. Springer, 2. Aufl., 2010.
- [55] PELSTER, R.; PIEPER, R.; HÜTTL, I. Thermospannungen-Viel genutzt und fast immer falsch erklärt. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 2005. 4:S. 10–22.

- [56] LOPEZ, E.M. Mikrostrukturentwicklung von Stahl im Reibkontakt. Diplomarbeit, 2014.
- [57] HEINE, B. Werkstoffprüfung: Ermittlung der Eigenschaften metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015.
- [58] ANTUSCH, S. Untersuchungen zum Einfluss von Russ im Öl auf den Motorenverschleiß-Betrachtung mechano-chemischer Reaktionen. Dissertation, Universität Karkruhe, 2008.
- [59] PIETSCHMANN, J. Industrielle Pulverbeschichtung: Grundlagen, Anwendungen, Verfahren. Springer-Verlag, 2010.
- [60] QUINN, T.F.J. Physical Analysis for Tribology. Cambridge University Press, 2005.
- [61] CSAPO, E.; ZAIDI, H.; PAULMIER, D.; KADIRI, E.K.; BOUCHOUCHA, A. Influence of the electrical current on the graphite surface in an electrical sliding contact. *Surface and Coatings Technology* 1995. 76-77:S. 421–424.
- [62] SCHÜRMANN, H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, 2007.
- [63] IVERS-TIFFÉE, E.; VON MÜNCH, W. Werkstoffe der Elektrotechnik. Springer-Verlag, 2013.
- [64] SPREADBOROUGH, J. The Frictional Behaviour of Graphite. *Wear* 1961. 5:S. 18–30.
- [65] VOLKMANN, W. Kohlebürsten: Untersuchungsergebnisse Erfahrungen, Schunk und Ebe GmbH. *Brühlsche Universitätsdruckerei* 1980.
- [66] JOACHIM RÖSLER; HARALD, H.; BÄKER, M. Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Teubner Verlag - GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 1. Aufl., 2003.
- [67] SCHAT, W.; WIETERS, K.P.; KIEBACK, B. Pulvermetallurgie. Springer Berlin Heidelberg New York, 2. Aufl., 2007.
- [68] HOINKIS, J. Chemie für Ingenieure. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 14. Aufl., 2015.
- [69] BARGEL, H.J.; SCHULZE, G. Werkstoffkunde. Springer Vieweg, 11. Aufl., 2012.
- [70] GRIGULL, U.; SANDNER, H. Wärmeleitung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2 Aufl., 1990.
- [71] UENO, T.; MORITA, N. Influence of Surface Roughness on Contact Voltage Drop of Sliding Contacts 2005:S. 324–328.
- [72] HANSEN, N. Hall-Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia* 2004. 51(8):S. 801–806.
- [73] HUBER, A. The lubrication of electrical Contacts. In 13th International Conference on Electric Contacts 1986. S. 447–462.
- [74] KÜCHLER, A. Hochspannungstechnik: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Aufl., 2009.
- [75] MÖLLER, U.J.; NASSAR, J. Schmierstoffe im Betrieb. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Aufl., 2002.
- [76] GROUP, S. Industrie- und Bahnkohlebürsten - Störung im Laufverhalten, 2002.
- [77] B, M.; KUHN, H.; SZENTPALY, L.V. Tunnelling Through Fatty Acid Monolayers And Its Relevance To Photographic Sensitization. *Chemical Physics Letters* 1971. 8(1):S. 82–84.

- [78] HIROTA, S.; ITOH, U.; TAKADA, K. The Effects of Thickness on the Electrical Conduction of Thin Poly(1-Trimethylsilyl-1-Propyne) Films. *Thin Solid Films* 1988. 165:S. 337–345.
- [79] POLYMEROPOULOS, E.E. Electron tunneling through fatty-acid monolayers. *Journal of Applied Physics* 1977. 48(6):S. 2404.
- [80] BÖNING, P. *Zeitschrift für Fernmeldetechnik* 1928. Band 9:S. 161.
- [81] GÜNTHER-SCHÜLZE, A. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 1922:S. 19.
- [82] HÄHNEL, A. Der elektrische Durchschlag in Isolieröl. *Archiv für Elektrotechnik* 1942:S. 716–734.
- [83] LYNCH, W.A.; SONDERGAARD, N.A. Liquid Additives to Improve Conductivity in Electric Contacts. *Electrical Contacts 2009, Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2009:S. 78–86.
- [84] ALSFASSER, R. *Moderne anorganische Chemie*. Walter de Gruyter, 2007.
- [85] WASSERSCHIED, P.; WELTON, T. *Ionic Liquids in Synthesis*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2002.
- [86] DOLD, C.; AMANN, T.; KAILER, A. Influence of structural variations on imidazolium-based ionic liquids. *Lubrication Science* 2013. (January):S. 251–268.
- [87] DOLD, C.; AMANN, T.; KAILER, A. Influence of electric potentials on friction of sliding contacts lubricated by an ionic liquid. *Physical chemistry chemical physics : PCCP* 2015. 17(16):S. 10339–42.
- [88] LI, H.; WOOD, R.J.; RUTLAND, M.W.; ATKIN, R. An ionic liquid lubricant enables superlubricity to be switched on in situ using an electrical potential. *Chemical communications (Cambridge, England)* 2014. 50(33):S. 4368–70.
- [89] WAKEHAM, D.; HAYES, R.; WARR, G.G.; ATKIN, R. Influence of temperature and molecular structure on ionic liquid solvation layers. *The journal of physical chemistry. B* 2009. 113(17):S. 5961–6.
- [90] NEELAKANTA, P. *Handbook of Electromagnetic Materials*. CRC Press LLC, United States of America, 1995.
- [91] WOLFSBERGER, H. *Elektromagnetische Schirmung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [92] HÄSSLER, H.; SCHREINER, H. Einfluss des Gasgehaltes auf die Eigenschaften von Silber-Basis-Kontaktwerkstoffen für die Energietechnik. *7th International Conference on Electrical Contact Phenomena* 1974:S. 155–162.
- [93] XIAOWEI, L.; JEAN-CHARLES, R.; SUYUAN, Y. Effect of temperature on graphite oxidation behavior. *Nuclear Engineering and Design* 2004. 227(3):S. 273–280.
- [94] RODRÍGUEZ, H.; WILLIAMS, M.; WILKES, J.S.; ROGERS, R.D. Ionic liquids for liquid-in-glass thermometers. *Green Chemistry* 2008. 10(5):S. 501.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung eines Kommutierungsvorgangs in einem Gleichstrommotor.	4
2.2	Stromverläufe während der Kommutierung.	4
2.3	Tribosystem eines E-Motors.	5
2.4	Struktur eines Graphitgitters.	6
2.5	Herstellungsschritte der Kohlebürsten. Nachdruck aus [12] mit freundlicher Genehmigung der MERSEN GmbH.	7
2.6	Graphitierungsgrad des Kohlenstoffs in Abhängigkeit der Temperatur.	8
2.7	Patina eines Kommutators.	10
2.8	Reibungszustände in Abhängigkeit der Schmierung.	11
2.9	Reibungskoeffizient einer Kohlebürste als Funktion der Temperatur.	12
2.10	Einflussfaktoren auf den Verschleiß des Tribosystems Kommutator-Bürste [25].	13
2.11	Spannungsverlauf im Lichtbogenegebiet [45].	14
2.12	Ellipsoidmodell nach HOLM.	17
2.13	Temperaturverteilung im Graphit-Kupfer-Kontakt [51][S.85], [52][S.143]. . .	20
2.14	Schematische Darstellung eines Kontaktmodells nach Hertz für den elastischen Kontakt [54][S.64].	24
2.15	Graphische Lösung zum mittleren Temperaturanstieg eines beweglichen Kontaktsystems	26
2.16	Schematische Darstellung des Aufbaus des Kohlebürstenprüfstands (KBP). . .	28
2.17	Schematische Darstellung der Verschleißmessung der Kohlebürste	29
2.18	Ermittlung des Bürstenverschleißes anhand des gemessenen Verschleißwegs und der Temperatur.	30
2.19	Ermittlung des Kommutatorsverschleißes mittels Konfokalmikroskops.	30
2.20	Ermittlung des Reibkoeffizienten aus dem Drehmoment.	31
2.21	Temperaturmessprinzip des Thermoelements.	32
2.22	Aufbau und Messprinzip des Dauerlaufprüfstands.	33
2.23	Schematische Darstellung des Messprinzips von Konfokalmikroskopie [56]. . .	34
2.24	Schematische Darstellung der Interaktionen des Primärelektronenstrahls mit der Probe.	35
2.25	links: Messprinzip des fokussierten Ionenstrahls. Rechts: FIB-Schnitt einer Kommutator-Oberfläche.	37
2.26	Aufbau eines Druckversuchs.	38
2.27	Schematische Darstellung des Wirbelstrommessprinzips.	38
3.1	Kohlebürste mit dazugehörigem Profilschnitt.	41
3.2	Kommutator mit dazugehörigem Profilschnitt.	42
3.3	Kupfer als Metallzusatz in einem Bürstenkörper.	43
3.4	REM-Aufnahmen von geschliffenen Kohlebürsten.	44

3.5	Vergrößerte REM-Aufnahmen der axial gepressten Bürste.	45
3.6	Quer- und Längswiderstand einer Kohlebürste.	45
3.7	Reibungs- und Verschleißmessung am KBP einer axialen, radialen und tangentialen Bürste bei $I = 0$ A.	47
3.8	REM-Aufnahme einer axial gepressten Bürstenoberfläche nach dem Versuchsende.	48
3.9	a) Kontaktwiderstand, b) gemittelte Temperaturen und c) Verschleißraten der positiven Bürsten, jeweils in axialer, radialer und tangentialer Pressung am KBP mit entfernten Ankerspulen, gemessen bei 2000 min^{-1} und $I = 4$ A. . .	50
3.10	XPS-Tiefenprofile der Kommutatoroberflächen beim Versuch mit a) axialen, b) radialen und c) tangentialen Bürsten.	51
3.11	Absoluter Verschleiß der positiven Kohlebürsten und des Kommutators. . . .	53
3.12	REM-Aufnahmen der Bürstenoberflächen jeweils mit a) axialer, b) radialer und c) tangentialer Pressrichtung nach dem Versuch am Dauerlaufprüfstand. . .	54
3.13	REM-Aufnahmen vom aufgerollten Verschleißmaterial auf der Oberfläche der radial gepressten Bürste, sowie die chemische Analyse dazu (EDX links unten). .	55
3.14	REM-Aufnahmen einer Lamelle aus einem Versuch mit einer axialen (a), radialen (b) und tangentialen (c) Pressrichtung.	56
3.15	EDX-Aufnahmen der dunklen Zone (a), sowie der hellen Zone (b) einer Kommutatorlamelle.	57
3.16	FIB-Schnitte in der dunklen Zone (jeweils links), sowie in der hellen Zone (jeweils rechts) in Versuchen mit a) axialen, b) radialen und c) tangentialen Bürsten. Die Schnitte sind in der Kommutatoroberfläche senkrecht zur Laufrichtung freigelegt.	59
3.17	Fremdschichtdicke der ablaufenden und auflaufenden Lamellenkanten. . . .	60
3.18	Mikroskopieaufnahme und 3D-Konfokaltbild eines a) unbehandelten sowie eines b) mit Wolframcarbid bestrahlten Kommutators.	63
3.19	Gefügestruktur eines unbehandelten (links) und eines mit Wolframcarbid bestrahlten (rechts) Kommutators.	63
3.20	XPS-Tiefenprofil einer unbehandelten (links) und einer mit Wolframcarbid bestrahlten (rechts) Kommutatoroberfläche.	64
3.21	Absoluter Verschleiß des Systems nach dem Bestrahlungsprozess.	65
3.22	Schematische Darstellung des Graphit-Kupfer-Kontakts einer radial gepressten und einer tangential gepressten Bürste.	67
3.23	Errechnete Temperaturerhöhung durch die Reibung.	69
3.24	Wärmestrom abhängig von der Materialausrichtung.	70
3.25	Einfluss der Anzahl der Graphitebenen auf die errechnete Temperaturerhöhung im elastischen und plastischen Kontakt.	72
3.26	Errechnete maximale Kontakttemperatur nach Holm's Modell.	74
3.27	Einfluss der Kontakttemperatur auf den Bürsten-Kommutator-Kontakt. . . .	75
3.28	Einfluss der Kommutierung auf den Verschleiß des Tribosystems.	76
3.29	Schematische Darstellung zur Kontakttrennung an der ablaufenden Lamellenkante aufgrund des ungleichmäßigen Verschleißes.	77
3.30	Schematische Darstellung des Verlaufs des Kurzschlussstroms bei der radial gepressten Bürste.	78

4.1	Mögliche positive und negative Effekte der Schmierung auf den elektrischen Kontakt [25][S. 414].	82
4.2	FIB-Schnitt einer Patina nach 1200 Stunden.	84
4.3	Eingruppierung der verwendeten Schmieröle. PAO4: Polyalphaolefine, PSL: Polyolester auf Basis synthetisches Öl und PAIL: (Polyalphaolefine with ionic liquid).	85
4.4	Verschleißrate der positiven Bürsten und des Kommutators in Abhängigkeit der Ölsorte.	87
4.5	Verlauf des Reibungskoeffizienten und des Widerstands bei PSL- und PAIL-Schmierung.	88
4.6	Reibkoeffizient eines Tribosystems ohne Schmierung und mit PSL-Schmierung bei $I = 0$ A und bei $I = 10$ A.	89
4.7	Vergleich des Reibungskoeffizienten zwischen dem trockenen Versuch, einmaliger und kontinuierlicher Ölkontamination.	90
4.8	Eine Lichtbogenerkennung am KBP zwischen der positiven Kohlebürste und dem Kommutator.	90
4.9	Strom- und Spannungsverlauf des Lichtbogens.	91
4.10	Gemittelte Verschleißwerte von Bürsten und Kommutatoren der Dauerlaufmotoren.	92
4.11	Lichtmikroskopieaufnahmen von Lamellenoberflächen nach 650h Dauerbetrieb: a) Referenzmotor, b) Motor mit PAIL und c) Motor mit PSL.	93
4.12	3D-Konfokalaufnahmen der Lamellen mit und ohne Schmierung.	94
4.13	Rauheiten der Lamellen mit und ohne Schmierung.	95
4.14	Mittelwerte der Rauheiten der positiven Bürsten und des Kommutators nach 650 h Dauerlauf.	95
4.15	REM-Aufnahmen der Kommutatoroberfläche des Referenzmotors.	97
4.16	Gefügestruktur der Kupferlamelle im neuen Zustand.	98
4.17	Gefügestruktur der Kupferlamelle des Referenzmotors	98
4.18	XPS-Tiefenprofil der Lamellenoberfläche des Referenzmotors nach 650h Dauerbetrieb.	99
4.19	Mikrostruktur der mit PAIL-Öl geschmierten Kommutatoroberfläche nach 650h Dauerlauf.	100
4.20	Gefügestruktur der Kupferlamelle des PAIL Versuchs.	101
4.21	XPS-Tiefenprofil der Kupferlamelle des PAIL-Versuchs nach 650 h Dauerlauf.	102
4.22	REM-Aufnahmen der mit PSL geschmierten Kommutatoroberflächen.	103
4.23	Gefügestruktur der Kupferlamelle im PSL-Versuch.	104
4.24	XPS-Tiefenprofil der Kupferlamelle im PSL-Versuch nach 650h Dauerlauf.	105
4.25	Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und dem positiven Bürstenverschleiß bei der PAIL- und PSL-Schmierung.	108
4.26	Zusammenhang zwischen dem Reibkoeffizienten, Widerstand und der Bürstentemperatur bei wiederholter PSL Ölkontamination.	109
4.27	Modell zum Kommutatorverschleiß bei der Kontamination des nicht leitenden Öls.	111
4.28	Flussdiagramm zum auftretenden Verschleißprozess während der Ölkontamination des schlecht leitenden Schmieröls.	113

5.1	Einfluss des spezifischen elektrischen Widerstands auf den Spannungsabfall (a), die Temperatur (b) und den Verschleiß (c) der Bürste.	117
5.2	Versuchsaufbau zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Kohlebürsten.	118
5.3	Nominelle technische Spannungs-Dehnungskurven einer niederohmigen und einer hochohmigen Kohlebürste.	119
5.4	Versagen einer niederohmigen und einer hochohmigen Kohlebürste.	119
5.5	Chemische Analyse der Elementzusammensetzung, mit XPS an den Korngrenzen einer niederohmigen und einer hochohmigen Kohlebürste gemessen. .	120
5.6	AES-Elementmapping an den Korngrenzen einer niederohmigen Kohlebürste.	121
5.7	Korrelation der Kupfer- und Zink-Verteilung in einem vergrößerten Bereich einer niederohmigen Bürste.	122
5.8	AES-Elementmapping an den Korngrenzen einer hochohmigen Kohlebürste.	123
5.9	XPS-Analyse an den Korngrenzen, sowie spezifischer Widerstand einer hochohmigen Bürste vor und nach wiederholtem Sintern.	124
5.10	Flussdiagramm zum auftretenden Verschleißprozess der fehlerhaft gesinterten Kohlebürste.	127
5.11	Widerstandsvergleiche von Bürsten mit und ohne Materialzusätze bei nicht ausreichender Sintertemperatur.	129
6.1	EDX-Analyse des Bürstengefüges.	147
6.2	Mittlere Rauheit der Oberfläche der Kohlebürsten und des Kommutators bei $I = 4 \text{ A}$	148
6.3	REM-Aufnahmen der Kontaktflächen der Kohlebürste nach dem Versuch mit Kommutierungsstrom.	149
6.4	XPS-Tiefenprofile der hellen Lamellenzone, sowie der dunklen Lamellenzone, jeweils in Pressrichtung.	150
6.5	Konfokalaufnahmen und Rauheitsmessungen der Lamellenoberflächen mit verschiedenen Strahlmitteln.	151
6.6	Chemische Struktur der ionischen Flüssigkeit [94].	155
6.7	Verlauf des Spannungsabfalls, der Bürstentemperatur, sowie des Bürstenverschleißes (über die gesamte Messzeit) der Kohlebürsten mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen.	157

Tabellenverzeichnis

2.1	Physikalische Eigenschaften von Graphit.	6
2.2	Physikalische Eigenschaften von Kupfer [21].	9
3.1	Chemische Zusammensetzung einer Kohlebürste.	41
3.2	KBP-Parameter für die Versuche mit entfernten Ankerspulen.	42
3.3	DLP-Parameter für die Dauerlaufversuche von kompletten Motoren.	42
3.4	Spezifisch elektrischer Widerstand der Kohlebürsten mit plättchenförmigen Kupferzusätzen.	46
3.5	Temperaturen der Bürsten nach einem 140 Stundenversuch bei $I = 0$ A.	47
3.6	Patinadicke bei einem Kupfergehalt von 95 At.-%.	49
3.7	Gemittelte Messwerte der Versuche aus dem DLP mit Kommutierung.	52
3.8	Verschleißdifferenz zwischen der ablaufenden und der auflaufenden Lamellenkante des Kommutators nach dem Dauerlaufversuch.	58
3.9	Eigenschaften des Strahlmittels Wolframcarbid im Vergleich zu Kupfer [14].	61
3.10	Werkstoffkonstante der Kohlebürste, sowie des Kupfers für die Berechnung des Modells.	68
3.11	Mittlerer Reibungskoeffizient für die Berechnung der Reibungstemperatur.	68
3.12	Gemessene Parameter zur Berechnung der Kontakttemperatur.	73
4.1	Versuchsparameter für Tribosystem mit Schmierölen ohne Kommutierungsstrom.	85
4.2	Versuchsparameter der Dauerlaufmessungen.	92
5.1	Versuchsparameter des Kohlebürstenprüfstands KBP.	116
6.1	Reibungstemperatur in einem elastischen Kontakt.	152
6.2	Reibungstemperatur im plastischen Kontakt.	152
6.3	Berechnung der Kontakttemperatur nach dem Modell von HOLM für einen elastischen Kontakt.	153
6.4	Berechnung der Kontakttemperatur nach dem Modell von HOLM für einen plastischen Kontakt.	153

Anhang A

Abb. 6.1 zeigt die chemische Analyse eines Bürstengefüges. Das dunkle Material entspricht Graphit und das helle Kupfer.

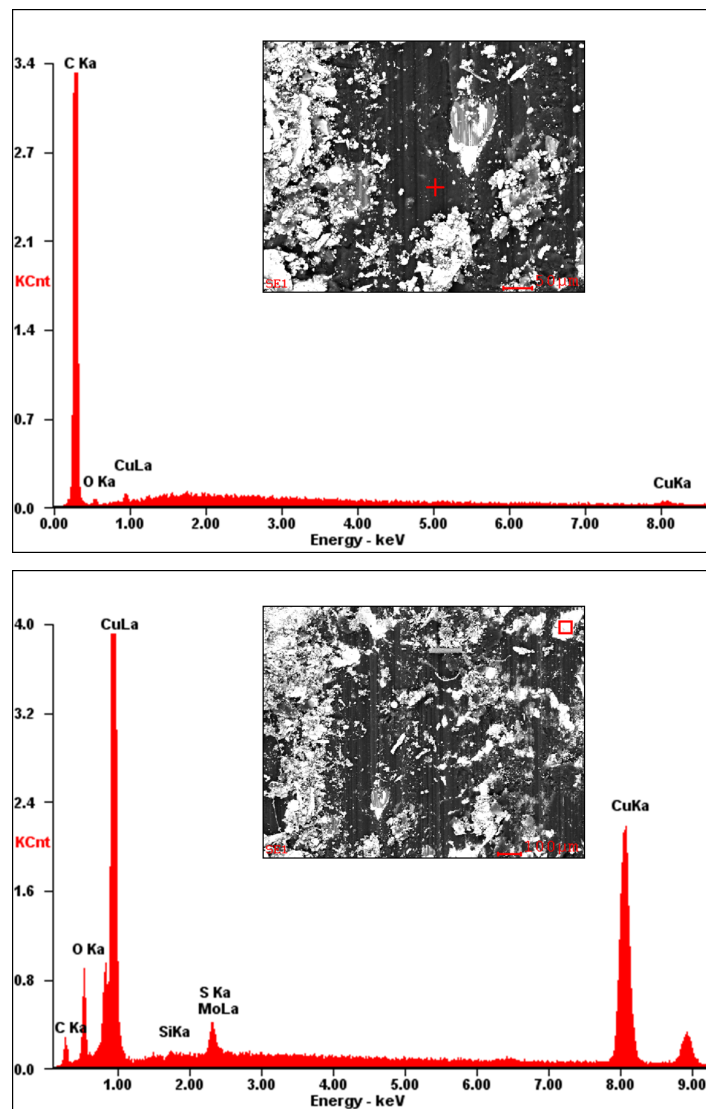


Abbildung 6.1: EDX-Analyse des Bürstengefüges.

Abb. 6.2 zeigt die mittleren Rauheiten, sowohl für die Bürsten-, als auch für die Kommutatoroberflächen nach dem Versuchsende bei $I = 4\text{ A}$.

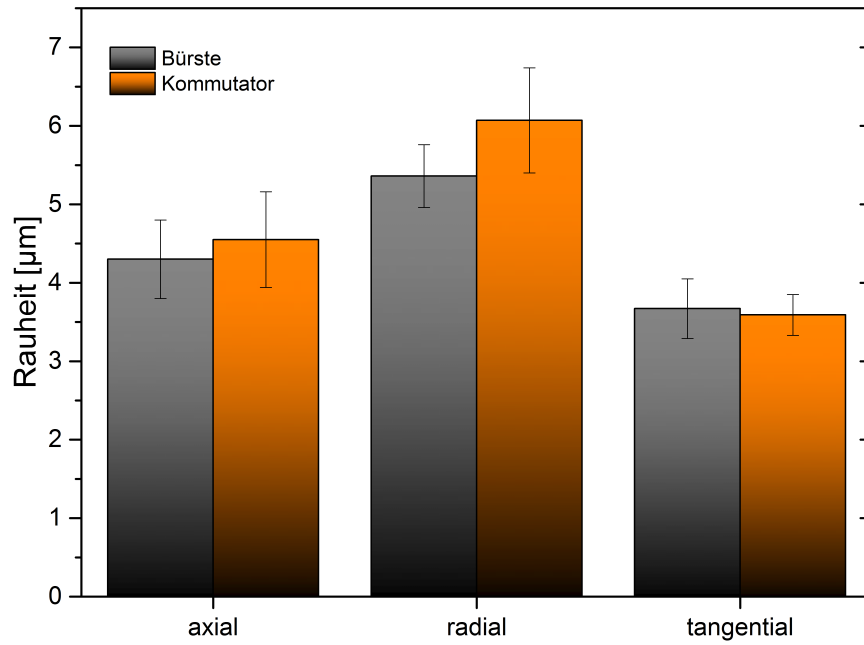
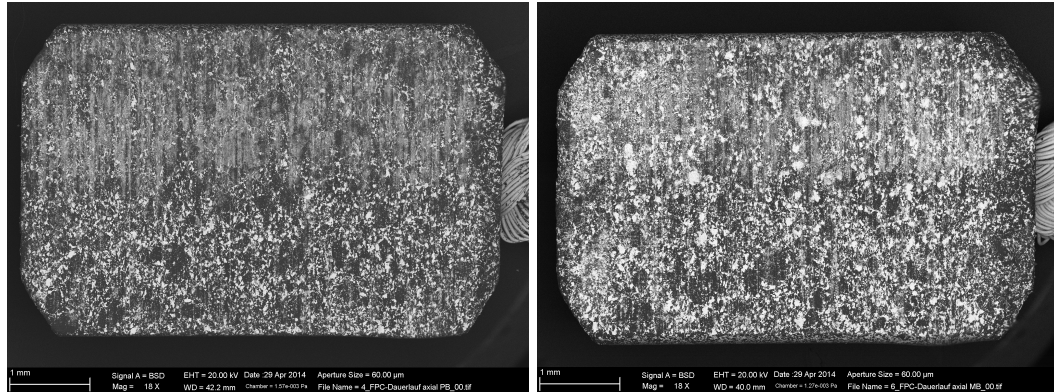
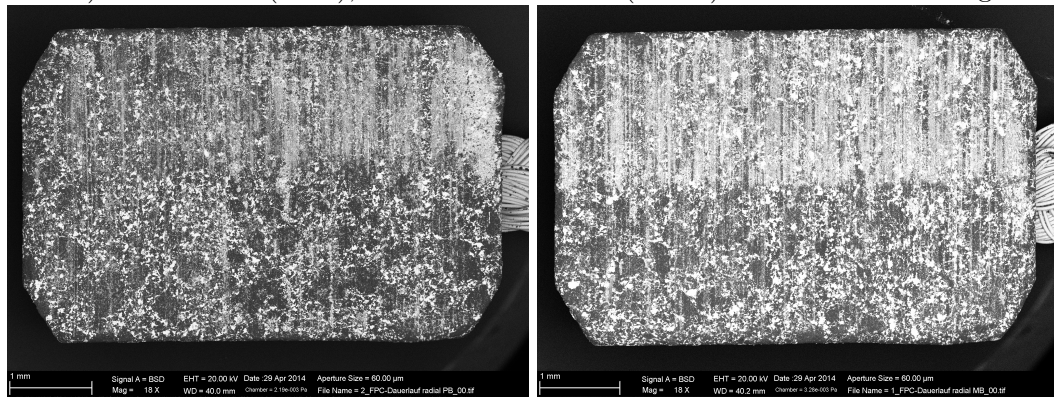


Abbildung 6.2: Mittlere Rauheit der Oberfläche der Kohlebürsten und des Kommutators bei $I = 4\text{ A}$.

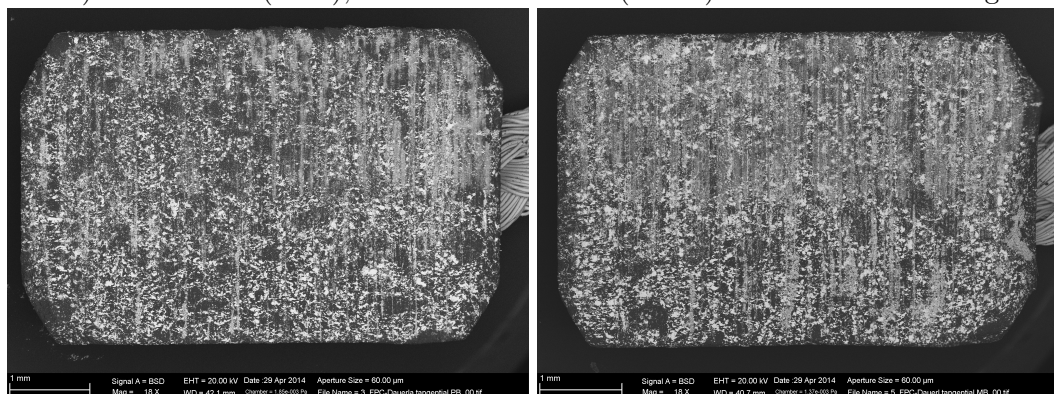
Abb. 6.3 zeigt die REM-Aufnahmen, sowohl der positiven Bürsten (links), als auch der negativen Bürsten (rechts) nach dem Dauerlaufversuch mit Kommutierung. Der helle Kontrast entspricht dem metallischen Werkstoff (Kupfer) und der dunkle Kohlenstoff.



a) Plus-Bürste (links), sowie Minus-Bürste (rechts) mit axialer Pressung



b) Plus-Bürste (links), sowie Minus-Bürste (rechts) mit radialer Pressung



c) Plus-Bürste (links), sowie Minus-Bürste (rechts) mit tangentialer Pressung

Abbildung 6.3: REM-Aufnahmen der Kontaktflächen der Kohlebürste nach dem Versuch mit Kommutierungsstrom.

Anhang A

Abb. 6.4 zeigt XPS-Tiefenprofile der hellen Lamellenzone (ablaufende Kante), sowie der dunklen Lamellenzone (auflaufende Kante), jeweils der Pressrichtung.

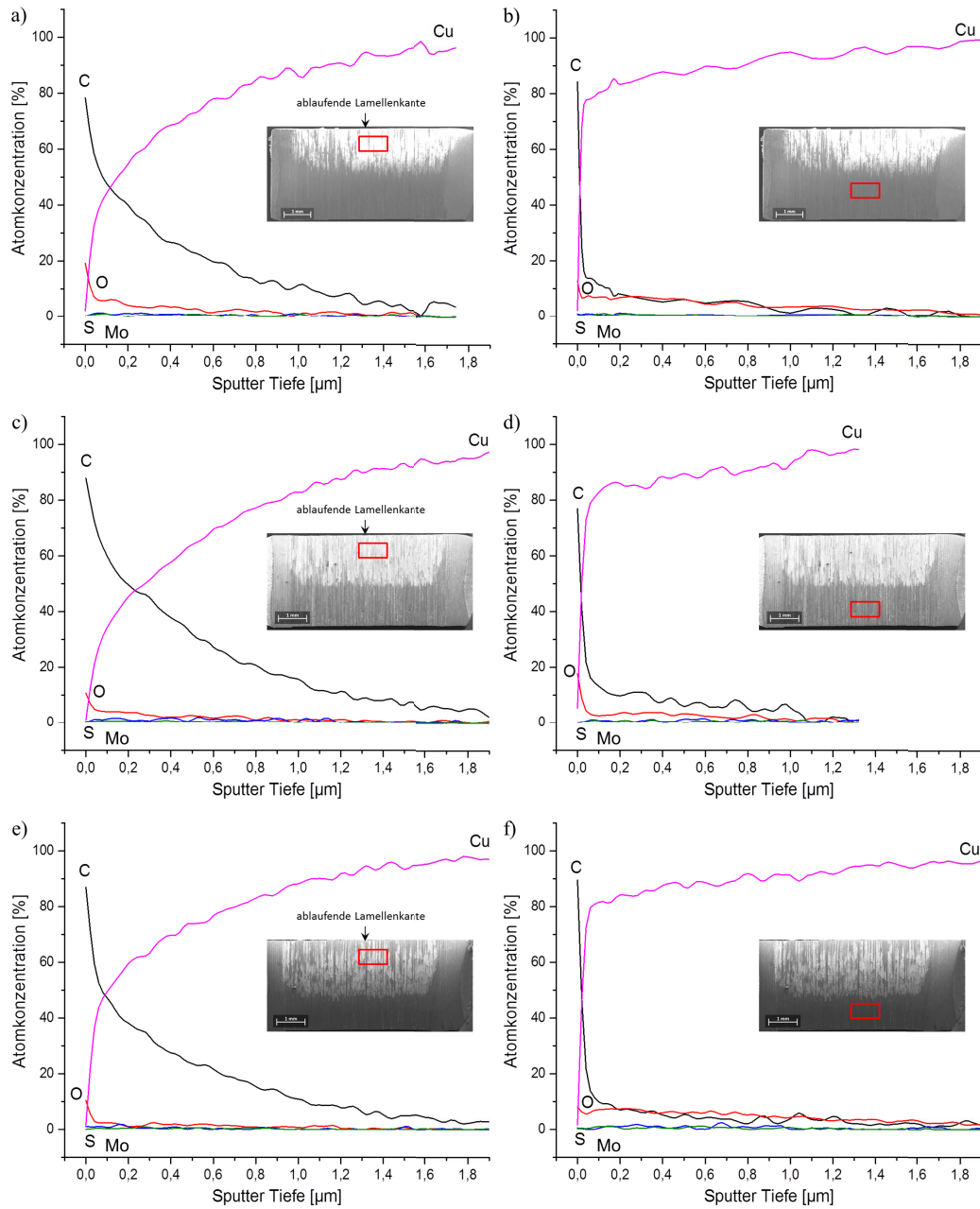


Abbildung 6.4: XPS-Tiefenprofile der hellen Lamellenzone (linke Spalte), sowie der dunklen Lamellenzone (rechte Spalte) jeweils der Pressrichtung.

Abb. 6.5 zeigt die 3D-Bilder der Kommutatorlamellen, sowie ihre Rauheitswerte, deren Oberflächen mit verschiedenen Strahlmitteln bearbeitet wurden.

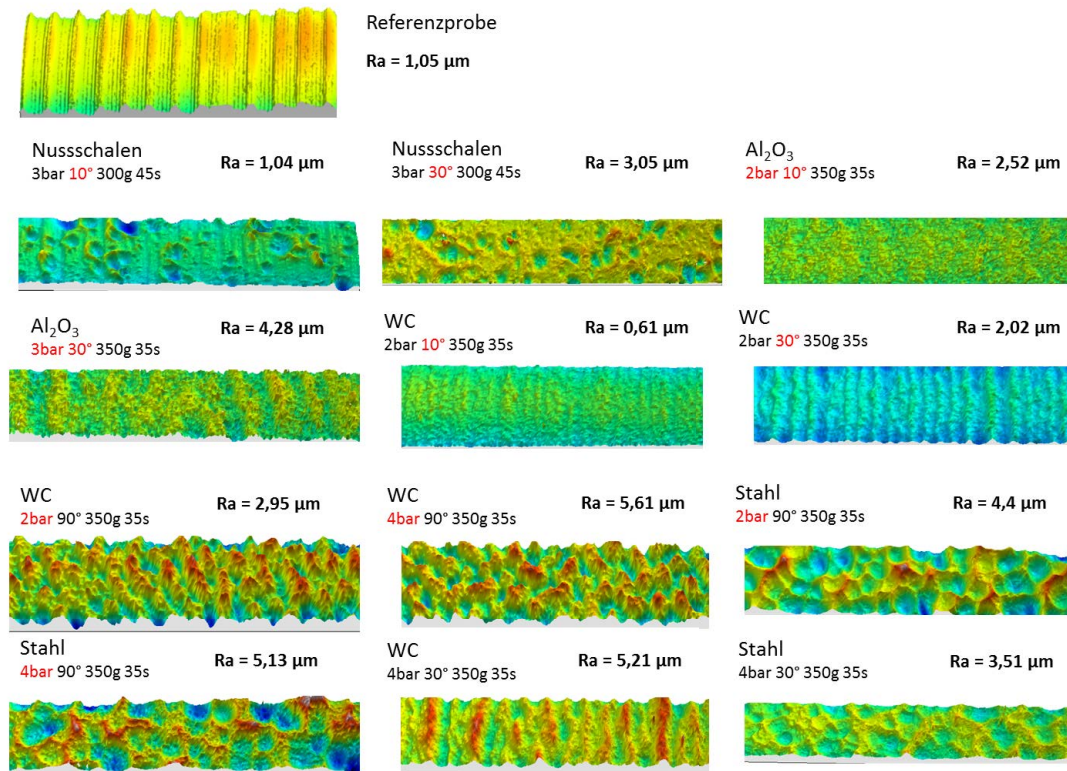


Abbildung 6.5: Konfokalaufnahmen und Rauheitsmessungen der Lamellenoberflächen mit verschiedenen Strahlmitteln.

Anhang A

In Tabelle 6.1 sind die erforderlichen Zwischenschritte zur Berechnung der Temperaturerhöhung durch Reibung für einen elastischen Kontakt dargestellt.

	axial	radial	tangential
Φ_r nach Gl. 2.38	0,72 W	0,27 W	1,08 W
E^* nach Gl. 2.47	1423,60	1423,60	1423,60
$a_{\text{elastisch}}$ nach Gl. 2.46	$3,81 \times 10^{-5} \text{ m}$	$3,81 \times 10^{-5} \text{ m}$	$3,81 \times 10^{-5} \text{ m}$
R_{th} nach Gl. 2.44	109,3 K/W	109,3 K/W	109,3 K/W
T_r nach Gl. 2.39 ($n = 1$)	78,8 K	30 K	118 K

Zeitverlauf der Reibungswärme in der Kommutatoroberfläche

Kontaktzeit t_v nach Gl. 2.57	$3 \times 10^{-4} \text{ s}$	$3 \times 10^{-4} \text{ s}$	$3 \times 10^{-4} \text{ s}$
Parameter z_r nach Gl. 2.53	23,7	23,7	23,7
$f(z_r)$ nach Abb. Kurve c	0,89	0,89	0,89
$T_{\text{rt}} = T_r \cdot f(z_r)$	70,1 K	26,3 K	105 K

Tabelle 6.1: Reibungstemperatur in einem elastischen Kontakt.

In Tabelle 6.2 sind die erforderlichen Zwischenschritte zur Berechnung der Temperaturerhöhung durch Reibung für einen plastischen Kontakt dargestellt.

	axial	radial	tangential
Φ_r nach Gl. 2.38	0,72 W	0,27 W	1,08 W
$a_{\text{plastisch}}$ nach Gl. 2.51	$6,9 \times 10^{-5} \text{ m}$	$6,9 \times 10^{-5} \text{ m}$	$6,9 \times 10^{-5} \text{ m}$
R_{th} nach Gl. 2.44	60,3 K/W	60,3 K/W	60,3 K/W
T_r nach Gl. 2.39 ($n = 1$)	43,4 K	16,3 K	65,1 K

Zeitverlauf der Reibungswärme in der Kommutatoroberfläche

Kontaktzeit t_v nach Gl. 2.57	$5,4 \times 10^{-4} \text{ s}$	$5,4 \times 10^{-4} \text{ s}$	$5,4 \times 10^{-4} \text{ s}$
Parameter z_r nach Gl. 2.53	13,1	13,1	13,1
$f(z_r)$ nach Abb. Kurve c	0,94	0,94	0,94
$T_{\text{rt}} = T_r \cdot f(z_r)$	40,8 K	15,3 K	61,2 K

Tabelle 6.2: Reibungstemperatur im plastischen Kontakt.

In Tabelle 6.3 sind die erforderlichen Zwischenschritte zur Berechnung der Temperaturerhöhung durch Reibung und der Strom für einen elastischen Kontakt dargestellt.

	axial	radial	tangential
Temperaturanstieg im ruhenden Kontakt			
T_{ϑ}/T_{θ} nach Gl. 2.28	0,41	0,41	0,41
T_{θ} nach Gl. 2.17, 2.20, 2.23, 2.25 u. 2.28	764 K	939 K	797 K
T_{ϑ} nach Gl. 2.28	316 K	389 K	330 K
Temperaturanstieg $T_{\vartheta t}$ in der Kommutatoroberfläche, abhängig von der Zeit			
Parameter z_{ϑ} nach Gl. 2.53	820	901	835
$f(z_{\vartheta})$ nach Abb. Kurve a	0,98	0,98	0,98
$T_{\vartheta t} = T_{\vartheta} \cdot f(z_{\vartheta})$	310 K	377 K	324 K
$T_{\vartheta \text{ ges}}$ nach Gl. 2.59	106 °C	138 °C	118 °C

Tabelle 6.3: Berechnung der Kontakttemperatur nach dem Modell von HOLM für einen elastischen Kontakt.

In Tabelle 6.4 sind die erforderlichen Zwischenschritte zur Berechnung der Temperaturerhöhung durch die Reibung und der Strom für einen plastischen Kontakt dargestellt.

	axial	radial	tangential
Temperaturanstieg im ruhenden Kontakt			
T_{ϑ}/T_{θ} nach Gl. 2.28	0,41	0,41	0,41
T_{θ} nach Gl. 2.17, 2.20, 2.23, 2.25 u. 2.28	764 K	939 K	797 K
T_{ϑ} nach Gl. 2.28	316 K	389 K	330 K
Temperaturanstieg $T_{\vartheta t}$ in der Kommutatoroberfläche, abhängig von der Zeit			
Parameter z_{ϑ} nach Gl. 2.53	820	901	835
$f(z_{\vartheta})$ nach Abb. Kurve a	0,93	0,93	0,93
$T_{\vartheta t} = T_{\vartheta} \cdot f(z_{\vartheta})$	294 K	357 K	303 K
$T_{\vartheta \text{ ges}}$ nach Gl. 2.59	62 °C	100 °C	92 °C

Tabelle 6.4: Berechnung der Kontakttemperatur nach dem Modell von HOLM für einen plastischen Kontakt.

Anhang B

Abb.6.6 zeigt die Synthese einer in dieser Arbeit verwendeten ionischen Flüssigkeit.

Bezeichnung: Klübersynth HB 72-102

Spezifischer Widerstand $\rho = 2,8 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$

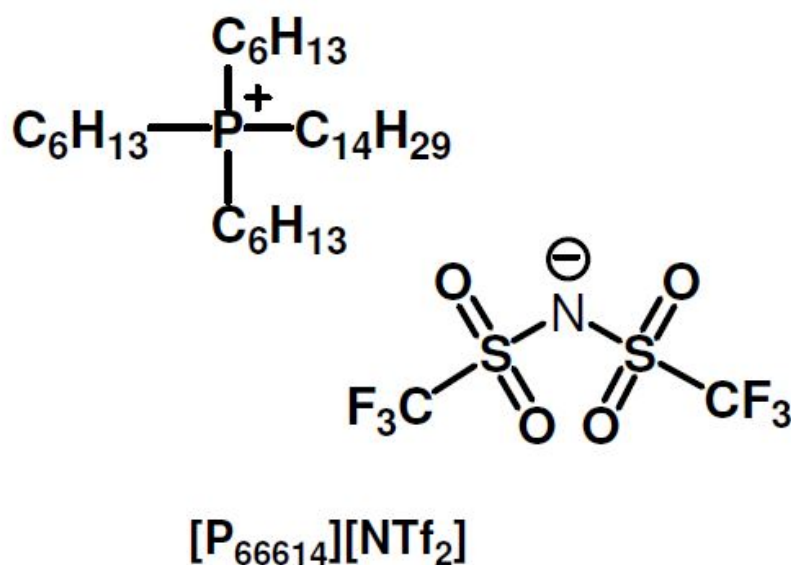


Abbildung 6.6: Chemische Struktur der ionischen Flüssigkeit [94].

Anhang C

In Abb. 6.7 ist der Verlauf des Spannungsabfalls, der Bürstentemperatur, sowie des Bürstenverschleißes (über die gesamte Messzeit) der Kohlebürsten mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen dargestellt.

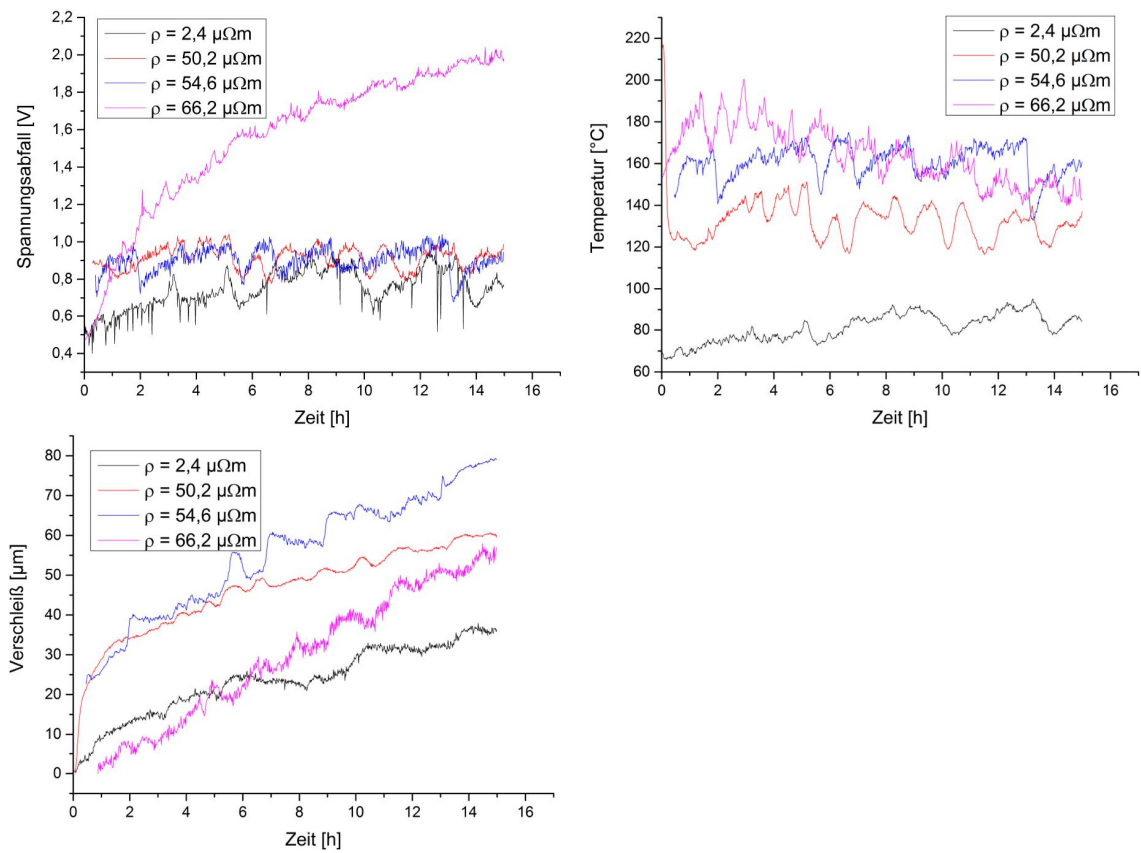


Abbildung 6.7: Verlauf des Spannungsabfalls, der Bürstentemperatur, sowie des Bürstenverschleißes (über die gesamte Messzeit) der Kohlebürsten mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen.

Publikationen

Veröffentlichungen

1. DIENWIEBEL, M.; FAKIH, B. The structure of tribolayers at the commutator and brush interface: A case study of failed and non-failed DC motors. *Tribology International* 2015, 92: S. 21–28

Konferenzbeiträge

- FAKIH, B.; WÖHR, S.; DIENWIEBEL, M. On the Influence of the Pressing Direction during Sintering of Carbon Brushes on the Tribology of DC Electric Motors. *Friction, Wear and Wear Protection* (DGM) 2014.